

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

ปัจจุบันในการผลิตน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ในประเทศไทยมีเป็นปริมาณมาก เพื่อการพัฒนาศรษฐกิจของประเทศ ก๊าซธรรมชาติที่ได้จากอ่าวไทยผลิตขึ้นมาประมาณ 600 – 700 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน เมื่อส่งเข้าโรงแยกก๊าซของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 3500 ตันต่อวัน เป็นผลพลอยได้ ซึ่งพบว่ามีปริมาณมากจึงควรที่จะนำเอาไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไปอีก หัวข้อต่อไปนี้เป็นกรกล่าวถึง รายละเอียดและคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะนำไปใช้ในงานวิจัยนี้

คุณสมบัติการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูง

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเฉื่อยไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ ไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ช่วยให้ไฟดับ หนักกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่า อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ - 55 ถึง 31 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 5 ถึง 74 บาร์ สภาวะวิกฤตอยู่ที่อุณหภูมิ 31.06 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤตที่ 73.8 บาร์ และความหนาแน่นวิกฤตเท่ากับ 0.468 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในภาคผนวก ก.

เมื่อพิจารณาแผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ (phase diagram) ในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ จะเห็นว่า มีเส้น 3 เส้นที่แบ่งคาร์บอนไดออกไซด์ออกเป็น 3 บริเวณตามสถานะ เส้นดังกล่าวคือ เส้นการเดือด (boiling line), เส้นการหลอม (melting line) และเส้นการระเหิด (sublimation line) บริเวณสามเหลี่ยมที่เป็นของของเหลวอยู่ระหว่าง เส้นการเดือด เส้นการหลอม และได้เส้นความดันวิกฤต เรียกว่า คาร์บอนไดออกไซด์เหลวสภาวะวิกฤต (subcritical liquid carbon dioxide) เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงแต่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น คาร์บอนไดออกไซด์เหลว จึงมีความสามารถในการเป็นตัวทำละลายแบบ medium solvent power โดยมากจะสกัดสารที่อุณหภูมิ 0 ถึง



20 องศาเซลเซียส

สภาวะวิกฤต หมายถึง สภาวะหนึ่งที่คุณสมบัติต่างๆของของเหลวและก๊าซ เช่น ความหนาแน่น, เอนทัลปี มีค่าเท่ากัน โดยที่สภาวะนี้ พบว่าของเหลวและก๊าซจะมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์และฟิสิกส์เหมือนกันแล้วอยู่ในสมดุลด้วยกัน

บริเวณที่อยู่เหนือจุดวิกฤต (critical point ในรูปคือ CP) เรียกว่า บริเวณสภาวะเหนือวิกฤต (supercritical region) เป็นบริเวณที่ไม่สามารถแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกเป็นของเหลว หรือก๊าซได้ หรือเรียกว่าอยู่ในสภาวะของไหลเหนือวิกฤต (supercritical fluid) ซึ่งในสภาวะนี้ solvent power จะขึ้นกับความดัน และอุณหภูมิ

ในทางปฏิบัตินิยมใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพสภาวะวิกฤต กล่าวคือ มีความดันลดทอน (reduced pressure, Pr) มากกว่า 1.0 และอุณหภูมิลดทอน (reduced temperature, Tr) เข้าใกล้ 1.0 เนื่องจาก ช่วงนี้สารจะมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีที่มีความหนาแน่นสูง ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิหรือความดันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ค่า solvent power ของสารสูงขึ้นมา เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.2 นอกจากนี้อาจจะใช้ในสภาพของเหลวที่ใกล้สภาวะวิกฤต (near-critical liquid) คือ มีอุณหภูมิลดทอนอยู่ในช่วง 0.95 ถึง 1.0 เพราะถ้าอุณหภูมิลดทอนยิ่งสูง ความหนาแน่นยิ่งลดลงทำให้ solvent power ลดลง และถ้าความดันลดทอนสูงกว่า 5 หรือ 6 จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากเนื่องจากการใช้ความดันสูง

ในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูง มีข้อได้เปรียบหลายประการ นอกจากคุณสมบัติพิเศษที่กล่าวข้างต้น ยังมีข้อได้เปรียบกว่าตัวทำละลายอื่น ดังนี้

- 1 ไม่เกิดปัญหาภาวะมลพิษ
- 2 ใช้พลังงานน้อย
- 3 คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยาเคมีง่าย
- 4 สามารถทำการสกัดสารแบบลำดับส่วนได้
- 5 คาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูก และไม่พิษ
- 6 ในกรณีการสกัดสารภายใต้ความดัน สารที่มีจุดเดือดสูงสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถสกัดสารที่มีจุดเดือดสูงได้
- 7 ไม่เกิดการสูญเสีย หรือการเปลี่ยนสภาพของสารที่ไม่อยู่ตัว หรือสลายตัวได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ
- 8 สามารถแยกตัวทำละลาย และตัวถูกละลายออกจากกันได้ง่าย ในภายหลัง
- 9 ในกรณีทางด้านเกี่ยวกับอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้บริโภค

สามารถใช้คาร์บอนไดออกไซด์ได้เพราะคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ

10 สามารถหมุนเวียนนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยง่าย

11 ไม่มีการเหลือคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตกค้างในสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ ส่วนข้อเสียเปรียบของกระบวนการดังกล่าวมีดังนี้

1 เป็นการยากที่จะยอมรับการใช้ความดันสูง ในอุตสาหกรรมที่ไม่มีปฏิบัติงานเกี่ยวกับการใช้ความดันสูง

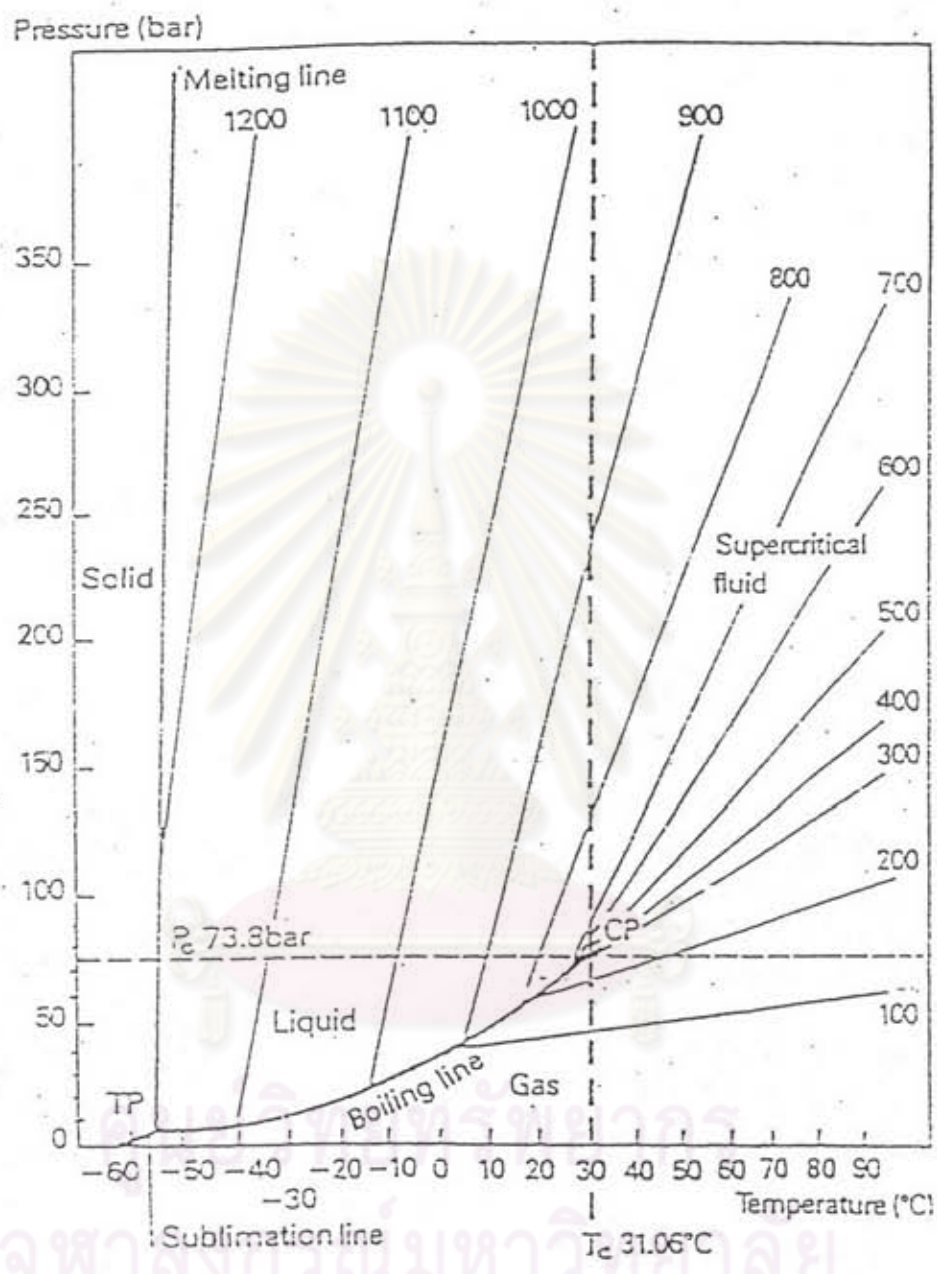
2 การลงทุนสร้างโรงงานสูงมากทำให้เสี่ยงต่อการลงทุน

3 ต้นทุนในการบำรุงรักษาสูง

ตัวอย่างการใช้ของไหลสภาวะเหนือวิกฤตสำหรับการสกัดสารในกระบวนการทางอุตสาหกรรมแสดงในตารางที่ 2.1

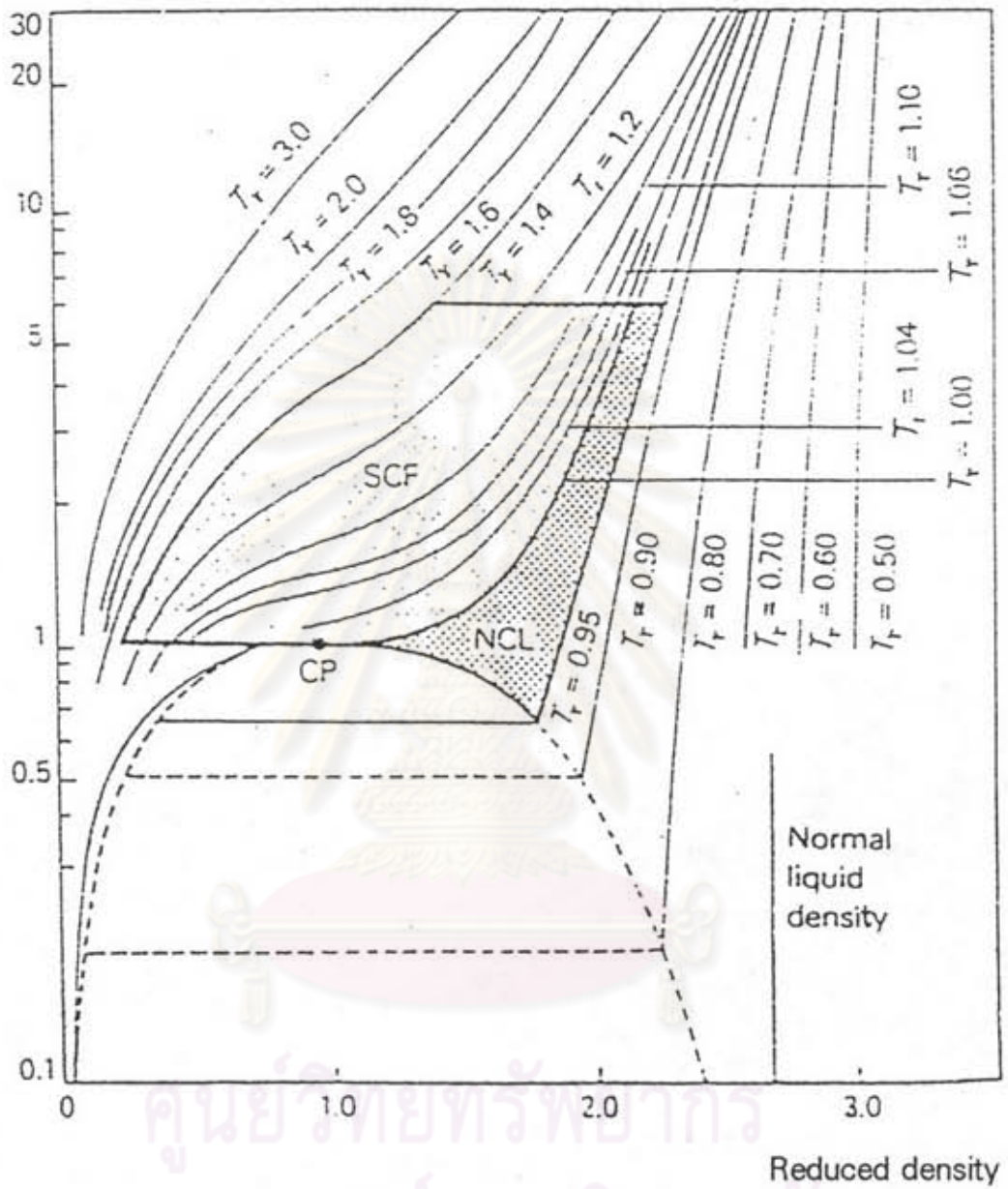
ในการสกัดสารด้วยโดยอาศัยสภาวะเหนือวิกฤตเป็นเทคนิคหนึ่งที่อาศัย solvent power ของของไหลสภาวะเหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิและความดันเหนือจุดวิกฤต ซึ่งจะมีประสิทธิภาพพิเศษในการแยกสาร ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำถึงปานกลาง และเป็นสารชนิดที่มีสภาพมีขั้วต่ำ (low polarity) หลักการของเทคนิคนี้มีข้อดีว่าการกลั่น คือ สามารถแยกสารที่อุณหภูมิปานกลางได้จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในอุตสาหกรรมด้านอาหาร และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ในการเปรียบเทียบกับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว พบว่า ของไหลสภาวะวิกฤตมีความสามารถในการแพร่สูง (high diffusivity) มีความหนืดต่ำทำให้สามารถสกัดสารได้เร็ว และเกิดการแยกตัวภาค ได้เร็วด้วย solvent power ของของไหลสภาวะวิกฤตสามารถเปลี่ยนไปได้ในช่วงกว้าง โดยการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิหรือความดัน และสามารถหมุนเวียนนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นของ คาร์บอนไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)
ที่มา : Faznjevic, 1976

Reduced pressure



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของความดันลดก่อน อุณหภูมิลดก่อน และความหนาแน่นลดก่อน
ที่มา : William, 1981

ตารางที่ 2.1 แสดงการสกัดสารด้วยของไหลภาวะวิกฤต ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม

ที่มา : Faznjevic, 1976

Charge	Extract	Solvent	Extraction conditions		Recovery conditions
			P, atm	T, C	
Petroleum	light HC	propane,propylene	100 – 50	100	50 bar100 C
Wool fat	lanolin	propane,propylene	60 – 110	100 – 105	1 bar
Petroleum	HC fractions	ethylene	40 – 120	20	40 bar
Coffee beans	caffeine	CO ₂ , N ₂ O	120 – 180	40 – 80	absorption on act. carbon
Tobacco	nicotine	CO ₂ , N ₂ O, SF ₆ aromatics, halog HC	65 – 1000	35 – 100	subcritical adsorption
Hops	resins, and acids	CO ₂	70 – 400	45 – 50	subcritical
Black pepper	piperine, ethereal and fatty oils	CO ₂	< 400	40 – 60	65 bar 25 – 60 C stripping with CO ₂
Cloves	eugenol	CO ₂	< 400	40 – 60	stripping with CO ₂
Cinnamon	cinnamic aldehyde	CO ₂	< 400	40 – 60	stripping with CO ₂
Vanilla beans	vanillan	CO ₂	< 400	40 – 60	stripping with CO ₂
Roast coffee	aromatic substances, glyceri des, fatty acids	CO ₂	< 320	– 50	65 bar
Fermented black tea	aromatic substances	CO ₂	< 300	– 50	50 – 70 bar

ทฤษฎีการดูดซับ (adsorption) (เพียรพรรค ทศคร,2534)

การดูดซับ เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมายในอุตสาหกรรม มีผู้ทำการรวบรวมการศึกษาทางปฏิบัติและศึกษาทางทฤษฎีไว้มากมาย การศึกษาถึง การดูดซับแบ่งออกได้เป็น 2 แบบกว้างๆ ดังนี้ คือ

- 1 nonflow system คือ สารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับ จะอยู่กับที่ตลอดเวลา
- 2 flow system คือ สารดูดซับมักจะอยู่กับที่ หรือเคลื่อนที่อยู่ในขีดจำกัดอันหนึ่งส่วนสารที่จะถูกดูดซับนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านสารดูดซับ

ต่อมาได้มีการศึกษาทางด้าน ทฤษฎีของฟลูอิดเซชันกว้างขวางขึ้น จึงได้มีการนำเอาวิธีการฟลูอิดเซชันมาประยุกต์กับกระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็น flow system ที่สารดูดซับเคลื่อนที่ แต่การศึกษาที่ทำนั้นเป็นการดูดซับระหว่างก๊าซกับของแข็ง ซึ่งมีความแตกต่างกันกับความดูดซับระหว่างของเหลวกับของแข็ง

1 หลักการพื้นฐาน

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ ที่โมเลกุลของสารไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของ ของแข็งหรือของเหลว สารที่ไปเกาะเรียก สารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) และของแข็งหรือของเหลวที่ผิวหน้าถูกสารนั้นไปเกาะเรียก สารดูดซับ (adsorbent) แรงที่ทำให้เกิด การเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับนั้นมี 2 ชนิด คือ

- 1 Van Der Waals Force เรียกการดูดซับนี้ว่า physical adsorption
- 2 Chemical interaction เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของ สารที่ถูกดูดซับ กับโมเลกุลที่ผิวหน้า ของสารดูดซับ เรียกการดูดซับแบบนี้ว่า chemical adsorption

ปริมาณของโมเลกุลของสาร ที่จะสามารถเกาะหรือถูกดูดซับอยู่บนผิวของสารดูดซับนั้นได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

- 1 ความดัน (P) หรือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ (C)
- 2 อุณหภูมิของการดูดซับ (T)
- 3 ชนิดของสารที่ถูกดูดซับ
- 4 ชนิดของสารดูดซับ

นั่นคือ
$$m = f(P, T, \text{Adsorbate}, \text{Adsorbent}) \quad (2.1)$$

แต่ในการดูดซับ สารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับจะถูกเลือกหรือกำหนดขึ้นตั้งนั้น

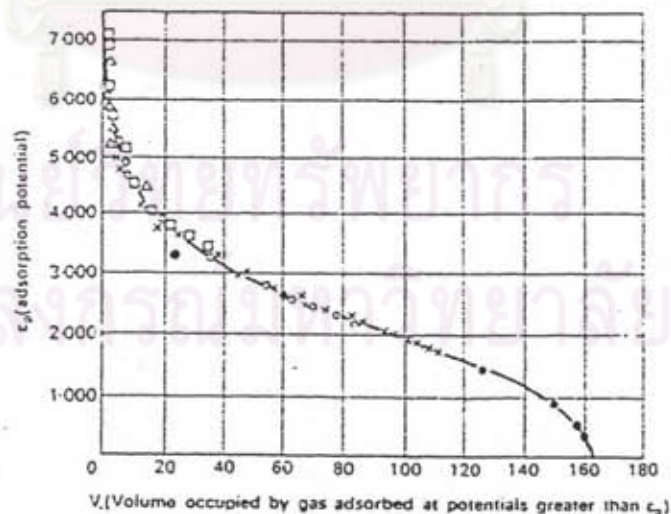
$$m = f(P, T) \text{ Adsorbate}, \text{ Adsorbent} \quad (2.2)$$

และถ้าทำ adsorption โดยการควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ (isothermal adsorption) ปริมาณของ m จะเปลี่ยนแปลงตาม P เท่านั้น

$$m = f(P) T, \text{ Adsorbate}, \text{ Adsorbent} \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.3) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ m ขึ้นอยู่กับ P เมื่อกำหนดชนิดของสารที่ถูกดูดซับ, สารดูดซับคู่หนึ่งๆ และอุณหภูมิ ในรูปที่ 2.3 แสดงถึง equilibrium curve การดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ molecular sieves ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ m นั้นจะขึ้นอยู่กับ P และ T เมื่อ P เพิ่มขึ้น (ที่อุณหภูมิคงที่) ค่าของ m จะเพิ่มตามด้วย และถ้าหากอุณหภูมิเปลี่ยนไป เช่นสูงขึ้น ปริมาณของ m จะลดลง (ถ้า P คงที่)



รูปที่ 2.3 แสดงการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ โดยถ่านไม้

ความสัมพันธ์ระหว่าง m กับ P เป็นรูปสมการได้ดังนี้

1 Freundlich equation

$$m = A P^{1/n} \quad (2.4)$$

2 Langmuir equation

$$m = m_0 bp / 1 + bp \quad (2.5)$$

3 B.E.T. equation

$$\frac{m}{m_0} = \frac{c \cdot p / p_0}{1 + cp / p_0} \quad (2.6)$$

สมการที่ 2.4 นั้นเป็น empirical equation คือ เป็นสมการของการดูดซับที่นิยมใช้ในการคำนวณผลในทางปฏิบัติ ในทางอุตสาหกรรมใช้ในช่วง P ไม่สูงและต่ำเกินไปนัก

สมการที่ 2.5 เป็น สมการของการดูดซับที่ได้มาจากการตั้งสมมติฐาน เกี่ยวกับสภาวะต่างๆ ในการดูดซับชั้นแล้วฟิล์มออกมา แต่มีข้อจำกัดหลายประการเช่นกัน เช่น ต้องเป็นการดูดซับแบบ monolayer คือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ จะเรียงอยู่บนพื้นผิวหน้า ของสารที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น ลักษณะของการดูดซับแบบนี้พบได้ในกลุ่มของ สารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับหลายตัวด้วยกัน โดยเฉพาะในช่วงที่ค่า P ต่ำๆ และการดูดซับระหว่างของเหลวกับของแข็ง

สมการที่ 2.6 หรือ BET equation นั้น เป็นสมการที่ค่อนข้างจะสมบูรณ์ ในแง่ของการอธิบายเหตุผล ทางด้านทฤษฎีของการดูดซับสามารถใช้ได้กับทั้งแบบ monolayer และ multilayer และยังใช้ประโยชน์ ในการหาพื้นผิวหน้าของสารดูดซับที่ใช้ในการดูดซับได้อย่างค่อนข้างแน่นอน และถูกต้อง

2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ลักษณะของการดูดซับ หรือการส่งถ่ายมวลสารจากที่อยู่ภายในสารละลายไปยังพื้นผิวหน้าของ ของแข็งนั้นมีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ

1 การถ่ายเทมวลสารของสารดูดซับจากที่ที่หนึ่ง เข้าสู่บริเวณรอบนอกที่ ใกล้เคียงกับพื้นผิวหน้าของสารดูดซับ (external diffusion)

2 การถ่ายเทของมวลสารจากรอบนอกที่ใกล้เคียงกับ พื้นผิวหน้าของสารดูดซับ เข้าสู่ภายในรูพรุนของสารดูดซับ (internal diffusion)

การแพร่กระจายภายนอก (External Diffusion) เป็น การส่งถ่ายมวลสารของสารดูดซับ จากของไหลไปยังบริเวณผิวของ สารดูดซับ หรือที่ทางเข้าไปภายในรูพรุนของสารดูดซับปริมาณของ มวลสาร ที่ถ่ายเทเป็นไป ตามสมการนี้

$$dm / dt = k_f S (c - c^*) \quad (2.7)$$

m = ปริมาณของสารดูดซับบนผิวของสารดูดซับ ต่อ น้ำหนักของสารดูดซับ (g/g)

t = ระยะเวลา

k_f = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลภายนอก

S = พื้นผิวหน้าของสารดูดซับ

c = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย

c^* = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวหน้าของของแข็ง

การแพร่กระจายภายใน (Internal Diffusion) คือการถ่ายเทมวลสารจากมวลสารที่ถูก ส่งถ่ายเข้ามาอยู่บริเวณที่ พื้นผิวหน้ารอบๆของสารดูดซับเข้าสู่ภายในรูพรุน ซึ่งมีพื้นผิวหน้ามาก มาย ในการดูดซับ

$$dm / dt = K_p a_v (m^* - m) \quad (2.8)$$

m^* = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล กับ c^*

a_v = พื้นผิวของสารดูดซับที่เกิดการส่งถ่ายมวลสารของสารที่ถูกดูดซับ

K_p = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนภายใน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยาง (rubber) ; (วารสาร วิชาการ, 2534)

ยาง เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) ซึ่งทางเคมี เรียกว่าเป็น สารประกอบพอลิเมอร์ (polymer) มีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความยืดหยุ่นได้ (elasticity) ในอดีต ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 วัตถุดิบยางที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง มีเพียงยางจากต้นพืช ที่พบครั้งแรกบริเวณตอนใต้ของทวีปอเมริกา ปัจจุบันได้มีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นมาหลาย เพื่อใช้ใน อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง ส่วนด้านยางธรรมชาติเอง ได้มีการพัฒนารูปแบบ ชนิด และ กรรมวิธีการผลิตขึ้นอย่างกว้างขวาง

พืชที่ให้ยางได้ มีประมาณ 2000 ชนิด แต่จะมีพืชเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถให้ยาง ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงการค้าได้ พืชที่สำคัญเหล่านี้ คือ ยางพารา และยางวายุแล่ พืชทั้งสอง ชนิดนี้ ให้ยางที่มีโครงสร้างทางเคมีเช่นเดียวกัน สามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางได้เหมือนกัน นอกจากนี้ยังมีพืชอื่นที่ให้ยางซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีต่างไปจากยางพารา ได้แก่ ยางกัตตา, ยางบาลาตา, ยางซิคเคิล

1 ยางพารา (*Hevea brasiliensis*)

ยางพารา เป็นพืชที่ปลูกอย่างมากในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งถือเป็นแหล่ง กำเนิดวัตถุดิบยางธรรมชาติที่สำคัญ และนับว่าเป็นพืชชนิดเดียวที่ให้ยางธรรมชาติ ที่นำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เป็นที่ยอมรับและเข้าใจกันว่า เมื่อกล่าวถึงยางธรรมชาติจะหมายถึง ยางที่ได้จากต้นยางพารา

2 ยางวายุแล่ (*Guayule*)

ยางวายุแล่ เป็นไม้พื้นเมือง ขึ้นในภาคเหนือ, ภาคกลางของเม็กซิโก และในภาค ตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐเทกซัส มียางอยู่ทั้งลำต้น ราก กิ่งก้าน ยกเว้นในใบ ต้นวายุแล่ที่เจริญ เต็มที่สูงประมาณ 75 - 100 เซนติเมตร ปกติจะเก็บผลผลิต เมื่อต้นมีอายุประมาณ 3 - 4 ปี การ เก็บผลผลิตมี 2 วิธี คือ วิธีที่หนึ่ง ถอนทั้งต้นขึ้นมา และอีกวิธีหนึ่ง ใช้วิธีตัดประมาณ 5 เซนติเมตร จากพื้นดิน การสกัดเอาน้ำยางจากต้นวายุแล่มีอยู่ในทุกๆ เซลล์ของต้น และเซลล์เหล่านี้ ต่างกระจายกระจายเป็นเซลล์โดดๆ ไม่ต่อเนื่องกันเช่นกรณีของเซลล์ในยางพารา ดังนั้น จึงไม่สามารถ กรีดเอาน้ำยางออกจากต้นวายุแล่ได้ ปัจจุบัน มีวิธีการสกัดเอาน้ำยางออกจากต้นวายุแล่ที่ทำเป็น เชิงการค้า 2 วิธี วิธีหนึ่ง ใช้เครื่อง Bauer Mill และอีกวิธีเป็นวิธีการที่ใช้กระบวนการตัวทำละลาย

คุณภาพของยางจากวายุแล่ เมื่อเปรียบเทียบกับ ยางจากยางพาราในด้าน ส่วน ประกอบมีความแตกต่าง คือ น้ำยางจากวายุแล่ มีส่วนของเนื้อยางแห้งประมาณ 10



เปอร์เซ็นต์ ขณะที่น้ำยางจากยางพารามีประมาณ 25 - 45 เปอร์เซ็นต์ ยางวายุเคมีมีปริมาณสารต่างๆ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน และโพลีเปปไทด์ น้อยกว่า ซึ่งสารเหล่านี้มีความสำคัญต่อกระบวนการที่จะนำยางไปใช้ต่อไป ส่วนด้านโครงสร้างทางเคมี เป็นสารประกอบทางเคมีที่เรียกว่า cis - 1,4 polyisoprene เช่นเดียวกัน สมบัติของยางดิบใกล้เคียงกัน

3 ยางกัตตา ยางบาลาตา และยางซิคเคิล (Gutta - Percha, Balata and Chicle)

พืชทั้งสามชนิดนี้ ให้ยางได้เช่นกัน แต่ยางจากพืชเหล่านี้มีสมบัติแตกต่างจากยางของต้นยางพารา มีส่วนประกอบแตกต่างกัน โครงสร้างทางเคมีของยางเหล่านี้เป็น โครงสร้างที่ต่างไปจากยางพารา และมีชื่อเรียกทางเคมีว่า tran - 1,4 polyisoprene ในเชิงการค้า จะใช้ยางกัตตาทำส่วนประกอบของลูกกอล์ฟและทำพื้นปloom ใช้ยางบาลาตาในอุตสาหกรรมการผลิตสายพาน และใช้ยางซิคเคิลทำหมากฝรั่ง

ยางสังเคราะห์ ได้เริ่มต้นจากการค้นคว้าวิจัย โดยอาศัยการศึกษาจากโมเลกุลของยางธรรมชาติ ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 (พ.ศ. 2457 - 2461) สาเหตุสำคัญ ที่ผลักดันให้เกิดการริเริ่มค้นคว้าวิจัยการผลิตยางสังเคราะห์ จนขยายมาเป็นผลิตเชิงการค้า สรุปได้ดังนี้

- ปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติ ที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ เพราะการคมนาคมติดต่อระหว่างประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติ กับประเทศผู้ใชยางธรรมชาติไม่สะดวก
- ราคาไม่แน่นอนของยางธรรมชาติ
- ความต้องการคุณภาพพิเศษบางประการ เช่น การผลิตท่อยาง ทนน้ำมัน ทนความร้อนสูงๆ การใช้ยางธรรมชาติ ไม่สามารถให้ผลผลิตที่มีความทนทานต่อน้ำมัน และความร้อนสูงๆได้

การผลิตยางสังเคราะห์โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerisation) ยางสังเคราะห์ที่ผลิตในเชิงการค้าในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด และแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ

1 ยางสังเคราะห์พวกรใช้งานทั่วไป (general purpose synthetic rubber)

ยางพวกนี้ จะไม่มีความทนทานต่อน้ำมัน ยางสังเคราะห์กลุ่มนี้ จะถูกผลิตขึ้นในปริมาณมาก เพราะมีวัตถุดิบประสงค์ใช้แทนยางธรรมชาติ ตัวอย่างยางสังเคราะห์กลุ่มนี้ คือ

IR	Synthetic Polyisoprene Rubber
SBR	Styrene-Butadiene Rubber
BR	Polybutadiene Rubber
IIR	Isobutylene Isoprene (Butyl) Rubber
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer

2 ยางสังเคราะห์พวกใช้งานพิเศษ (special purpose synthetic rubber)

พวกนี้จะมีความทนทานพิเศษต่อ น้ำมัน ตัวทำละลาย ความร้อน และสารเคมี ตัวอย่างยางสังเคราะห์กลุ่มนี้ คือ

CR	Chloroprene or Neoprene Rubber
NBR	Acrylonitrile Butadiene (Nitrile) Rubber
CSM	Chlorosulphonated Polyethylene Rubber (Hypalon)
ACM	Polyacrylic Rubber
SI	Silicone Rubber
TR	Polysulphide (Thiokol) Rubber

น้ำยางธรรมชาติ

1 สมบัติและส่วนประกอบของน้ำยาง

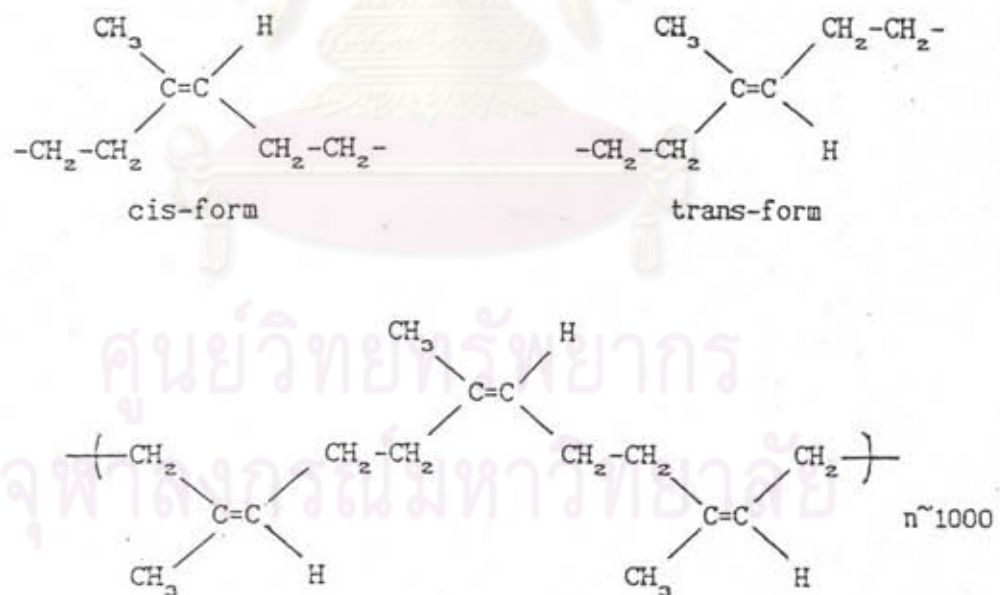
น้ำยางสดจากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม ในทางเคมีจัดเป็นสารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975 – 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มี pH ประมาณ 6.5 – 7.0 ความหนืดไม่แน่นอน มีส่วนประกอบของสารต่างๆไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุต้นยาง การกรี๊ด และฤดูกาล เป็นต้น ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2

ยางธรรมชาติ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เขียนเป็นสูตรเคมี คือ $(C_5H_8)_n$ เรียกชื่อทางเคมีว่า โพลีไอโซพรีน (polyisoprene) โครงสร้างโมเลกุลยางเป็นแบบ cis-configuration ดังรูปที่ 2.4 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000,000 รูปร่างของอนุภาคยางเป็นรูปกลม หรือรูปลูกแพร์ ขนาด 0.05 – 5 ไมครอน

ยางมีความยืดหยุ่นได้ เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของยางแต่ละโมเลกุล เป็นขดของสายโมเลกุลที่เกิดจากหน่วยย่อยของไอโซพรีนต่อเนื่องกัน ยางชิ้นหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยขดของสายโมเลกุลที่พันกันอย่างยุ่งเหยิง สายโมเลกุลเหล่านี้ มีสมบัติ ถูกหักงอ หรือ ยืดได้ (flexible) การดึงหรือยืดชิ้นยาง ก็เท่ากับยืดสายโมเลกุลของยางให้คลายออก แต่เมื่อปล่อยคืนให้ความเป็นอิสระกับชิ้นยาง สายโมเลกุลยาง ก็จะพยายามหดตัวกลับมาขดอยู่ในสภาพเดิม

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ
ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2534

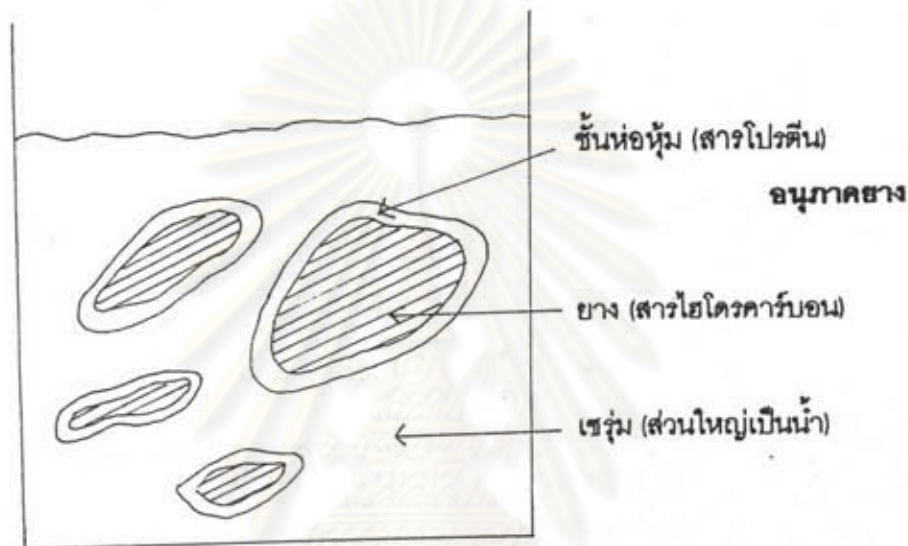
ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์(โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content,TSC)	36
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content,DRC)	33
สารพวกโปรตีน	1 – 1.5
เถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ.....ในปริมาณที่รวมกับสารอื่นๆ แล้วเป็น	100



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ
ที่มา : Brydson , 1978

2 การรักษาสภาพและการเสีสภาพของน้ำยาง

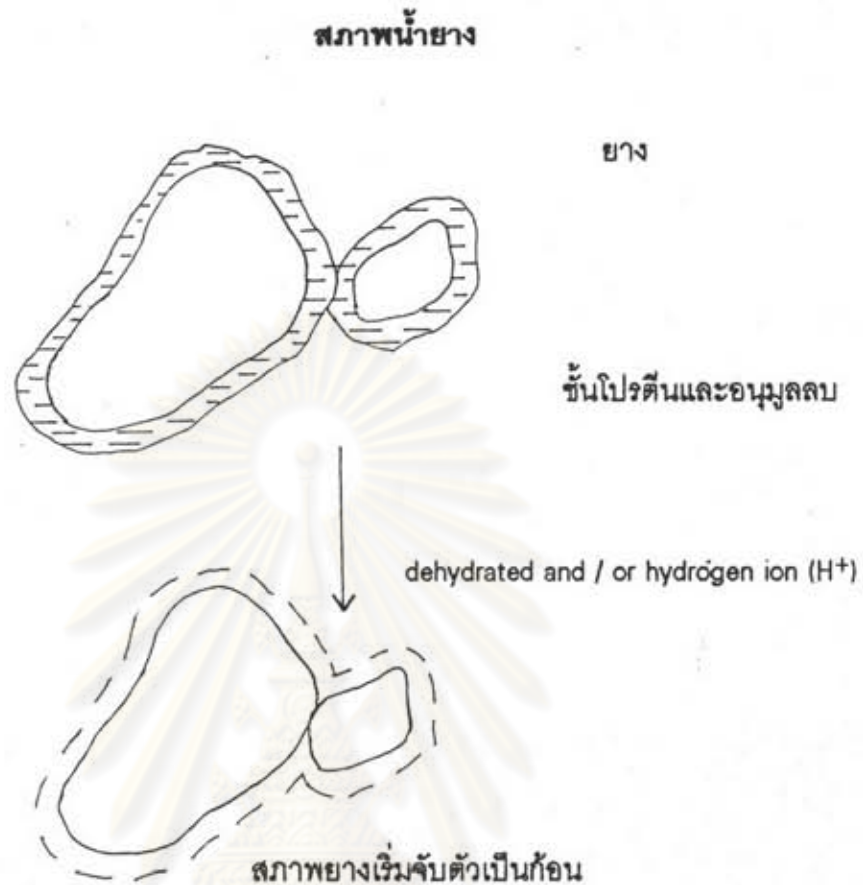
น้ำยางสด เป็นสารแขวนลอยที่มีส่วนของอนุภาคยาง (rubber particle) แร่วนลอย กระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่าเซรัม (serum) ในน้ำยาง มีส่วนของ สารโปรตีน (ตารางที่ 2.2) ส่วนหนึ่งของสารโปรตีนนี้ จะห่อหุ้ม อยู่รอบผิวของอนุภาคยาง เปลือก ห่อหุ้ม (hydrated protein envelope) อนุภาคไว้ (รูปที่ 2.5) ชั้นห่อหุ้มนี้ มีความสำคัญต่อสถานะความคงตัวเป็นของเหลวของน้ำยาง เพราะชั้นโปรตีนนี้ป้องกันไม่ให้แต่ละอนุภาคยางรวมตัวกัน



รูปที่ 2.5 แสดงสถานะการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยางสด
ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกุล, 2534

นอกจากชั้นโปรตีนจะห่อหุ้ม ทำหน้าที่รักษาสถานะการเป็นของเหลวให้น้ำยางแล้ว ในชั้นโปรตีนนี้ ยังมีอนุมูลลบของคาร์บอกซีเลต ($\text{carboxylate } \text{R.COO}^-$) ซึ่งก่อให้เกิดการผลักรันระหว่างอนุภาคยาง นั่นคือ น้ำยางคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้ด้วยปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ ชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง และอนุมูลลบของคาร์บอกซีเลต

การเสีสภาพจากการเป็นของเหลวของน้ำยาง จะเกิดขึ้นเมื่อมีการทำลายปัจจัยสำคัญทั้งสองดังกล่าวข้างต้น เช่น การสูญเสียน้ำ (dehydrated) ในชั้นของโปรตีน การทำลายอนุมูลลบของคาร์บอกซีเลต สภาพที่น้ำยางถูกกระทบกระเทือนดังกล่าวนี้ จะทำให้อนุภาคยางเกิดการรวมตัวกันจับเป็นก้อนยาง เรียกว่า โคแอกกูลัม (coagulum) แยกจากส่วนของเซรัม (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 แสดงน้ำยางเสียสภาพจับเป็นก้อนยาง

ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2534

3 สารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง (Preservatives)

เนื่องจากในน้ำยางสด มีส่วนประกอบหลายชนิด ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ ได้แก่ พวกร้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส จุลินทรีย์ในอากาศจะลงปะปนในน้ำยาง มีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงที่ก่อให้เกิด กรดทำลายชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน เรียกว่าการจับตัวนี้ว่า การจับตัวที่เกิดเองตามธรรมชาติ (natural or spontaneous coagulation) การเกิดจะช้าเร็วเพียงใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความคงตัวของน้ำยาง พันธุ์ยาง เป็นต้น ดังนั้น เพื่อป้องกันน้ำยางจับตัวเป็นก้อนก่อนเวลาที่ต้องการ หรือ เพื่อให้น้ำยางอยู่ในสภาพของเหลวตามต้องการ จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

3.1 สมบัติของสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีที่จะใช้รักษาสภาพน้ำยางควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์
- ควรมีสภาพเป็นด่างเพื่อส่งเสริมสถานะแขวนลอยให้น้ำยาง
- ทำให้อนุผลโลหะหนักไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เพราะอนุผลเหล่านี้ จะส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์
- สามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ ที่ช่วยการเจริญของจุลินทรีย์
- ไม่เป็นพิษต่อคนและต่อคุณภาพของยาง และขจัดได้สะดวก

3.2 ชนิดของสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีชนิดแรก ที่พบว่ามีประสิทธิภาพในการรักษาสภาพน้ำยางได้ คือ แอมโมเนีย และจนปัจจุบัน แอมโมเนียก็ยังคงเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการรักษาสภาพน้ำยาง นอกจากแอมโมเนีย สารอื่นๆที่ใช้รักษาสภาพน้ำยาง ได้แก่ ฟอรัมาลดีไฮด์ โซเดียมซัลไฟด์ เป็นต้น

เนื่องจากปัจจุบัน ได้มีการค้นคว้าวิจัยชนิดของสารเคมี ที่จะใช้รักษาสภาพน้ำยาง และพบว่ามีหลายชนิด ในการเลือกใช้สารเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์ของการรักษาสภาพ เช่น จะรักษาน้ำยางสด เพื่อนำไปแปรรูปเป็นยางดิบชนิดใดๆ ก็จะต้องเลือกชนิดสารเคมีรักษาสภาพ ให้เหมาะสม หรือจะเก็บรักษาน้ำยางชั้นไว้ใช้นานๆ ก็จะต้องเลือกชนิดสารเคมีให้ถูกต้อง เป็นต้น

4 สารเคมีทำให้น้ำยางจับตัว (Coagulant)

เนื่องจาก น้ำยางสดจะเกิดการจับตัวได้เองตามธรรมชาติ ดังนั้น ปฏิกิริยาที่จุลินทรีย์ใช้ สารบางอย่างในน้ำยางเป็นอาหาร จนก่อให้เกิดการทำลายชั้นห่อหุ้มอนุภาคยาง อย่างไรก็ตามการเกิดน้ำยางจับตัวตามธรรมชาตินั้น กว่าจะเกิดการจับตัวอย่างสมบูรณ์ จะต้องใช้เวลานาน ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการจะผลิตยางดิบชนิดยางแห้ง ขั้นตอนแรก ของกระบวนการผลิตยางแห้ง จะต้องทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน หากจะรอให้น้ำยางเกิดการจับตัวเองจะต้องเสียเวลานาน จึงจำเป็นต้องเร่งการจับตัวของยาง โดยการใส่สารเคมีพวกกรด ซึ่งจะสลายตัวให้อนุผลบวก ไปทำลายชั้นห่อหุ้มอนุภาคยาง เรียกการจับตัวแบบนี้ว่า acid coagulation

กรดใดๆที่สลายตัวให้อิออนบวกของไฮโดรเจน (H^+) สามารถใช้ทำให้น้ำยางจับตัวได้ เพราะ H^+ จะทำลายอนุผลลบของคาร์บอกซีเลตที่อยู่รอบๆ



อนุภาคยาง เกิดกรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งรอบอนุภาคยาง ทำให้พลังยึดรอบอนุภาคยางสูญเสียไป ชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางแฟบ อนุภาคยางจะรวมกัน และจับตัวเป็นก้อน (รูปที่ 2.6) แม้ว่ากรดหลายชนิด สามารถทำให้น้ำยางจับตัวได้ แต่กรดที่ได้ทำการค้นคว้าวิจัย และพบว่าเหมาะสม ในการทำให้น้ำยางจับตัวเพื่อนำไปผลิตเป็นยางแห้ง เช่น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ ยางแท่ง คือ กรดฟอร์มิก แต่ถ้าจะทำให้หางน้ำยาง (skim latex) จับตัว เพื่อทำเป็นยางสกีสมควรใช้กรดซัลฟูริก

ชนิดของยางธรรมชาติ

ปัจจุบันยางดิบจากธรรมชาติ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง มีจำหน่ายหลายชนิด ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ยางแห้ง และน้ำยางข้น

1 ยางแห้ง (dry rubber)

ยางธรรมชาติในรูปของยางแห้งแบ่งเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของกรรมวิธีการผลิต คือ

1.1 ยางแบบธรรมดา ผลิตโดย conventional process ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ

1.2 ยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน ผลิตโดยมีเงื่อนไขการระบุคุณภาพมาตรฐานสากล (technically specified process) ได้แก่ ยางแท่ง (block rubber)

1.3 ยางแบบอื่นๆ มีวิธีการผลิตเฉพาะ เพื่อให้ได้ผลผลิตเหมาะสมกับงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ หรือเพื่อวัตถุประสงค์ จะปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ ได้แก่

- ยางที่มีความหนืดคงที่ (CV, viscosity stabilized rubber)
- ยางที่มีสมบัติความพิเศษในกระบวนการผลิต (SP, superior processing rubber)
- ยางผสมน้ำมัน (OENR, oil-extended natural rubber)
- ยางเอ็มจี (MG, methylmethacrylate grafted)
- ยางเทอร์โมพลาสติก
- ยางอีพ็อกซิไดซ์ เป็นต้น

2 น้ำยางข้น (concentrated latex)

น้ำยางข้นที่ผลิตจำหน่ายทั่วไป อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ น้ำยางข้นธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพกับสารเคมีหรือวิธีการใดๆ ให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลงไป ส่วนอีกประเภทหนึ่ง เป็นน้ำยางข้นที่ได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยเคมี หรือด้วยการฉายรังสีให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลง ประเภทหลังนี้เรียกว่า น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (prevulcanised or vulcanised latex)

การผลิตยางแห้ง

ปัจจุบันยางแห้งที่ผลิตในประเทศ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ ยางแห้ง และยางสกิม กรรมวิธีการผลิตยางแห้งมีรายละเอียดดังนี้

วัตถุดิบจากต้นยางพาราที่จะนำไปผลิตเป็นยางแห้งต่างๆ ได้แก่

- น้ำยางจากสวน (fresh or field latex) นำไปผลิตเป็น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพคุณภาพดี และยางแห้งคุณภาพดี
- ยางแห้งที่จับตัวแล้ว (dried rubber, naturally coagulated) ได้แก่ พวงเศษยางก้อน (cup lump) ที่ติดกันด้วยรับน้ำยาง เศษยางตามรอยกรีด ยางแห้งตามเปลือกไม้ ยางแห้งตามพื้นดิน เป็นต้น เศษยางเหล่านี้หรือที่ชาวสวนเรียกว่า ชียาง จะถูกนำไปผลิตเป็นยางเครพ และยางแห้งคุณภาพต่ำ

1 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

การผลิตยางแผ่นรมควัน ประกอบด้วย การรวบรวมน้ำยางสดจากสวน กรองน้ำยางด้วยแรงกรองเบอร์ 40, 60, 80 เมช เพื่อแยกสิ่งสกปรก และสิ่งเจือปนมาในน้ำยางออก บรรจุน้ำยางลงถังพัก เพื่อรวมน้ำยางที่มาจากหลายๆ แห่ง ให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเพื่อให้โอกาสสิ่งเจือปนที่อาจหลงเหลืออยู่ได้ตกตะกอนลงก้นถัง ต่อไป จึงเจือจางน้ำยางให้เหมาะสมในการทำ ให้จับเป็นก้อนยางที่เหมาะสมกับกระบวนการขั้นต่อไป เมื่อเจือจางน้ำยางตามต้องการแล้ว จึงเติมกรดฟอร์มิกให้น้ำยางจับตัว แล้วจึงรีดก้อนยางให้เป็นแผ่น ด้วยเครื่องรีด ยางที่รีดได้จะมีความหนาประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร ถูกนำไปผึ่งในที่ร่ม อากาศถ่ายเทสะดวกเพื่อให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นจึงนำไปรมควันให้แห้งในโรงรมควันที่ปกติ ใช้วิธี การเผาไหม้ไม้ อากาศควันไฟรมให้ยางแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 50 - 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 4 - 10 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาและปริมาณของแผ่นยางที่บรรจุในโรงรม ตลอดจนการระบายความชื้นของโรงรม ยางที่รมควันแห้งแล้วจะถูกคัดเลือกเพื่อจัดชั้นด้วย การดูด้วยสายตา (visual grading) เป็นชั้นต่างๆ คือ ยาง

แผ่นรมควันชั้น 1, 2, 3, 4 และ 5 ขั้นสุดท้าย คือ การอัดเป็นก้อนน้ำหนักก้อนละ 100 กิโลกรัม ฉาบหรือเคลือบก้อนยางด้วยสารละลายยางผสมกับแป้ง เพื่อป้องกันก้อนยางติดกัน

น้ำยางสด (ผ่านการกรองแยกสิ่งสกปรก)

จับตัวด้วยกรดฟอร์มิก หรือ อะซิติก

ยางจับเป็นก้อน

เครื่องรีดยาง

ยางแผ่นหนาประมาณ 2 - 3 มม.

ผึ่งในที่ร่ม

ยางแผ่นดิบ (Unsmoked sheet, USS)

โรงรมควัน (อุณหภูมิ 50 - 60 เซลเซียส.)

ใช้เวลาประมาณ 4 - 10 วัน

ยางแผ่นรมควัน

ตรวจจัดชั้นด้วยสายตา

หีบห่อจำหน่าย

รูปที่ 2.7 แสดงผังการผลิตยางแผ่นรมควัน

ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2534

2 ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air Dried Sheet, ADS)

ยางแผ่นผึ่งแห้ง เป็นยางแผ่นที่มีสีจาง ผ่านกรรมวิธีการผลิตทำนองเดียวกับการผลิตยางแผ่นรมควัน แต่มีวิธีการทำให้แผ่นยางแห้งโดยใช้ความร้อนที่ปราศจากควันไฟ ไม่มีการเติมสารเคมีอื่นๆ ที่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ นอกจากสารเคมีที่ได้รับอนุญาต ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ และพาราไนโตรฟินอล เนื่องจากการผลิตยางแผ่นผึ่งแห้งจะเน้นเรื่องสีของแผ่นยาง ดังนั้น ในการผลิต จึงจำเป็นต้องคัดเลือกว่ายางที่มีสีขาว และควบคุมการผลิตเพื่อให้ได้ผลผลิตในขั้นสุดท้าย เป็นยางที่มีสีจางและสีใส

ขั้นตอนต่างๆ ของการผลิต เช่นเดียวกับการผลิตยางแผ่นรมควัน ยกเว้นจะมีการเติมซัลไฟด์ลงในถ้วยรับน้ำยาง เพื่อป้องกันน้ำยางจับตัวตามธรรมชาติ ซึ่งจะทำให้ยางมีสีคล้ำได้ และเมื่อรวบรวมน้ำยางได้แล้ว จึงเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งหากเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้เอนไซม์ในน้ำยางเปลี่ยนแปลง และเป็นผลให้ยางมีสีคล้ำได้เช่นกัน เมื่อผ่านขั้นตอนต่างๆ จนได้ยางแผ่นแล้ว ก็จะนำแผ่นยางไปอบแห้งในโรงอบที่ไม่มีควันไฟ อุณหภูมิการอบแห้งประมาณ 50 – 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 4 – 10 วัน ขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นยาง และประสิทธิภาพของโรงอบยาง ขั้นสุดท้าย คือ ตรวจและอัดหีบห่อ ทาสารละลายยางกับแป้งรอบผิวก้อนยาง หรือมักใช้พลาสติกห่อกันก้อนยางติดกันแทนการทาด้วยสารละลายยางกับแป้ง เตรียมส่งจำหน่ายต่อไป

3 ยางเครพ (Crepe)

ยางเครพที่ผลิตในประเทศไทย มี 2 ชนิด คือ เครพชนิดคุณภาพดีเรียกว่า เครพสีจาง (pale crepe) และเครพคุณภาพต่ำเรียกว่า เครพสีน้ำตาล (brown crepe) เครพสีจางใช้วัตถุดิบที่เป็นน้ำยางสดมาผลิต ส่วนเครพสีน้ำตาลผลิตมาจากเศษยางที่จับตัวแล้ว

3.1 ยางเครพสีจาง

การผลิตยางเครพสีจาง มีหลักการสำคัญ คือ เรื่องสีของน้ำยาง การควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่จะมีผลก่อให้เกิดยางสีคล้ำ

ขั้นตอนการผลิตยางเครพสีจาง คือ รวบรวมน้ำยางสดที่ได้คัดเลือกจากพันธุ์ยางที่ให้น้ำยางสีขาว รักษาสภาพน้ำยางด้วย โซเดียมซัลไฟด์ หรือ ฟอรัมาลดีไฮด์ หรือ แอมโมเนีย กรองน้ำยางด้วยแรงกรองเบอร์ 60 เมช แล้วเจือจางน้ำยางด้วยน้ำสะอาด เติมสารละลายโซเดียมเมตาซัลไฟด์ ป้องกันปฏิกิริยาของเอนไซม์ จากนั้น จึงทำให้น้ำยางจับตัวเพียงบางส่วน โดยการคำนวณปริมาณกรดที่เติม เพื่อให้เกิดการจับตัวเพียงส่วนของสารอื่นๆ (โปรตีน สารสีพวกคาโรทีนอยด์) ที่ไม่มีความเสถียรเสียก่อน และแยกสารเหล่านี้ออกจากน้ำยาง ขั้นต่อไปจึงเติม

สารช่วยฟอกสียาง แล้วจึงเติมกรดฟอร์มิกให้น้ำยางจับตัวอย่างสมบูรณ์ และผ่านก้อนยางจับตัวเข้าเครื่องเครพรีดยางออกมาเป็นแผ่นเครพหนา 2 - 3 มิลลิเมตร ผึ่งสะเด็ดน้ำ อบแห้ง ใช้ความร้อนประมาณ 50 องศาเซลเซียส และหีบห่อจำหน่าย ปกติมักห่อเครพสีจางด้วยพลาสติก หรือกระดาษสีน้ำตาล



รูปที่ 2.8 แสดงผังการผลิตยางเครพ
ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2534

3.2 ยางเครพสีน้ำตาล

เครพสีน้ำตาล เป็นเครพที่มีปริมาณการผลิตมากกว่าเครพสีจางเพราะวิธีการผลิตไม่ยุ่งยากเช่นกับการผลิตเครพสีจาง วัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นพวกยางที่แห้งมาก่อนแล้ว หรือ คือพวกซียางที่ชาวสวนเก็บรวบรวมมาขาย ขั้นตอนของการผลิต จะประกอบด้วยการจัดเชื้อปนต่างๆ ที่ติดมากับยาง วิธีการที่ใช้ปฏิบัติกัน คือ การหมัก หรือแช่ซียางในบ่อที่ปล่อยให้น้ำไหลชะล้างสิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ มีโอกาสตกตะกอนลงกันถึง ขั้นตอนต่อไป ก็ผ่านซียางที่หมักไว้นานพอสมควรไปยังชุดเครื่องจักรแยกสิ่งสกปรก ซึ่งหลักสำคัญของการทำงานของเครื่องจักรนี้ คือ เครื่องจักรซึ่งประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงขนานกัน มีเครื่องยนต์จุดให้ลูกกลิ้งหมุนเข้าหากัน ซียางจะถูกส่งผ่านเข้ารับการบดระหว่าง 2 ลูกกลิ้ง ซียางที่ผ่านเครื่องบดและส่งผ่านออกมาที่สายพานนั้น จะมีระบบการฉีดพ่นน้ำสะอาด เพื่อช่วยชะล้างสิ่งสกปรกออกจากยาง จำนวนครั้งหรือจำนวนเครื่องที่ใช้บดแยกสิ่งสกปรกออกจากยาง ขึ้นอยู่กับความสกปรกของซียาง เมื่อซียางถูกขจัดสิ่งสกปรกออกแล้ว ซียางเหล่านี้จะถูกส่งเข้าเครื่องรีดเครพ และฝั่งสะเด็ดน้ำ อบแห้ง และหีบห่อ ฉาบสารละลายยางผสมแป้งเพื่อเตรียมจำหน่ายต่อไป รูปที่ 2.7 เป็นผังแสดงการผลิตยางเครพสีจาง หรือ เครพขาวและเครพสีน้ำตาล

4 ยางแท่ง (Block Rubber or Technically Specified Rubber, TSR)

ยางแท่งหรือ ยางที่ผลิตโดยมีวิธีการระบุคุณภาพมาตรฐาน เป็นยางที่ประเทศมาเลเซียได้ริเริ่มขึ้นเมื่อ ปี 2508 โดยมีเหตุผล เพื่อการปรับปรุงรูปแบบการผลิตยางธรรมชาติให้ลดระยะเวลาของการผลิต มีการตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐานสากล และจำแนกชั้นโดยวิธีการในห้องปฏิบัติการ และตามข้อกำหนดสากล ยางแท่งของแต่ละประเทศจะมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น

SMR Standard Malaysian Rubber

SIR Standard Indonesian Rubber

TTR Thai Tested Rubber

สำหรับประเทศไทย ได้เริ่มการผลิตยางแท่งมาตั้งแต่ปี 2511 วัตถุประสงค์ใช้ผลิตยางแท่ง ใช้ได้ทั้งน้ำยางสดจากสวน และยางแห้งที่จับตัวแล้ว หลักการสำคัญของวิธีการผลิตยางแท่ง คือ มีขั้นตอนการตัดย่อยก้อนยางให้เป็นเม็ด หรือ ชิ้นเล็กๆอย่างรวดเร็ว ล้าง อบแห้ง และอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยม

4.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยาง

ขั้นตอนการผลิต เริ่มต้นจาก การคัดเลือกน้ำยางที่มีสีขาวสม่ำเสมอ รักษาสภาพด้วยสารป้องกันน้ำยางจับตัว และใช้สารป้องกันปฏิกิริยาของเอนไซม์ในน้ำยาง รวมน้ำยางในถังพัก เพื่อผสมให้น้ำยางที่มาจากที่ต่างๆกันมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเจือจางน้ำยางด้วยน้ำสะอาด ทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดฟอร์มิค นำก้อนยางที่จับตัวใหม่ๆ (สด) ผ่านเครื่องรีดแผ่นเครพ ผ่านเครื่องจักรตัดค่อยเป็นชิ้นหรือเม็ดเล็กๆ ล้างยางด้วยน้ำสะอาด นำไปเข้าเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง แล้วเป่าลมเย็น หรือทิ้งให้ยางเย็นลงประมาณ 60 องศาเซลเซียส นำไปอัดเป็นแท่งๆละ 33 1/3 กิโลกรัม ขนาด 675*330*190 มิลลิเมตร ท่อแท่งยางด้วยแผ่นพลาสติกโพลีเอททิลีน บรรจุลงไม้ เพื่อจำหน่ายต่อไป

4.2 การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง

ขั้นตอนสำคัญของการผลิตยางแท่งจากยางแห้งพวกซียาง ก็ทำนองเดียวกับการผลิตยางเครพสีน้ำตาล คือ การขจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับซียางออก วิธีการปฏิบัติในการขจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้ก็เช่นเดียวกับ วิธีการที่ใช้กับ การผลิตยางเครพสีน้ำตาล คือ การหมักแช่ และ การใช้เครื่องจักรตัดล้าง หลังจากแยกสิ่งสกปรกออกแล้ว จะผ่านยางไปยังชุดเครื่องรีดเครพ ชุดเครื่องจักรตัดค่อยเป็นชิ้นเล็กๆ ล้างด้วยน้ำสะอาด นำยางเข้าเครื่องอบยาง เป่าให้ยางเย็นลงอัดเป็นแท่ง หีบห่อด้วยพลาสติกโพลีเอททิลีน และบรรจุลงไม้เพื่อจำหน่ายต่อไป

4.3 การจำแนกชั้นยางแท่ง

จากข้อบกพร่องของยางธรรมชาติ ที่ผลิตโดยกรรมวิธีแบบดั้งเดิมธรรมดา ซึ่งล้วนอาศัยวิธีการจำแนกชั้นด้วยการตรวจลักษณะยางโดยสายตา ยางแท่งซึ่งเป็นรูปแบบใหม่ของยางธรรมชาติ ได้ปรับปรุงวิธีการจำแนกชั้น โดยอาศัยการตรวจสอบสมบัติที่จำเป็นของยางตามวิธีมาตรฐานสากล (technically grading) วิธีการตรวจสอบตลอดจนข้อกำหนดชั้นต่างๆของยางแท่ง ผู้ผลิตยางแท่งจะต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขที่วางไว้ โดยองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (International Organization for Standardization, ISO)

วิธีการจำแนกชั้นยางแท่ง คือ เมื่อผลิตได้ยางแท่งในขั้นก่อนห่อด้วยพลาสติก จะทำการสุ่มตัวอย่างแท่งยาง 10 เปอร์เซ็นต์ ของชุดผลการตัดตัวอย่าง ให้ตัดที่มุมทแยงของแท่งยาง 2 มุม รวมเก็บตัวอย่างแท่งละไม้ต่ำกว่า 250 กรัม ตัวอย่างยางเหล่านี้จะถูกนำไปตรวจสอบสมบัติต่างๆที่กำหนดไว้ ได้แก่

- 1 ปริมาณสิ่งสกปรก (dirt content)
- 2 ปริมาณเถ้า (ash content)
- 3 ปริมาณไนโตรเจน (nitrogen content)
- 4 ปริมาณสิ่งระเหย (volatile matter content)
- 5 ความอ่อนตัวเริ่มแรก และดัชนีความอ่อนตัวของยาง (initial plasticity, P_o ; and plasticity retention content index, PRI)

สำหรับในประเทศไทย การผลิตยางแท่งมีชั้นต่างๆ 5 ชั้นคือ ยางแท่ง ที.ที.อาร์. ชั้น 5 แอล, 5, 10, 20 และ 50 ตารางที่ 2.3 แสดงการกำหนดขีดจำกัดของสมบัติยางแท่ง ที.ที.อาร์. ชั้นต่างๆ

ตารางที่ 2.3 แสดงการกำหนดขีดจำกัดของสมบัติยางแท่งที.ที.อาร์.ชั้นต่างๆ
ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2534

สมบัติ	ชั้นยางที.ที.อาร์.				
	5L	5	10	20	50
เปอร์เซ็นต์สิ่งสกปรก (ใช้แรงขนาด 325 เมช)	0.05	0.05	0.10	0.20	0.50
เปอร์เซ็นต์เถ้า ไม่เกิน	0.60	0.60	0.75	1.00	1.50
เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ไม่เกิน	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
เปอร์เซ็นต์สิ่งระเหย ไม่เกิน	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ดัชนีความอ่อนตัว ไม่ต่ำกว่า	60	60	50	40	30
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกไม่ต่ำกว่า	30	30	30	30	30
สียางเทียบโดยโลวิบอนด์ ไม่เกิน	6.0	-	-	-	-
รหัสชั้นใช้สี	เขียวอ่อน	เขียวอ่อน	น้ำตาล	แดง	เหลือง
พลาสติก(โพลีเอทิลีน) ใช้ห่อยาง	โปร่งแสง	โปร่งแสง	โปร่งแสง	โปร่งแสง	โปร่งแสง
แถบโพลีเอทิลีนใช้พันยาง	โปร่งแสง	ขาวทึบแสง	ขาวทึบแสง	ขาวทึบแสง	ขาวทึบแสง

5 ยางskim (Skim rubber)

ในการผลิตน้ำยางชั้นจะมีผลพลอยได้ คือ หางน้ำยาง ที่มีปริมาณเนื้อยางอยู่ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ และการปรับเครื่องบั่นน้ำยาง หางน้ำยางเหล่านี้ถูกนำไปแปรรูปเป็นยางดิบแห้ง เป็นชนิดskimบล็อก (skim block) หรือ ชนิดskimเครพ (skim crepe) จำหน่ายต่อไป

5.1 การผลิตยางskim

หางน้ำยาง เมื่อออกจากเครื่องบั่น จะผ่านการไล่แอมโมเนียโดยวิธีการปล่อยให้หางน้ำยางไหลไปตามรางรองรับซึ่งมีอากาศพัดผ่าน ลงสู่บ่อพักที่อยู่ในที่โล่ง มีอากาศพัดผ่านช่วยไล่ก๊าซแอมโมเนียได้ดี หางน้ำยางควรเหลือแอมโมเนียเพียง 0.2 เปอร์เซ็นต์ (ต่อนักหนักหางน้ำยาง) ก่อนทำการจับให้หางน้ำยางเป็นก้อน ด้วยการเติมกรดซัลฟูริก ถ้าหางน้ำยางมีปริมาณเนื้อยางอยู่ต่ำมากอาจมีปัญหาการจับตัวของหางน้ำยาง แก้ไขโดยการผสมน้ำยางสด (อาจใช้น้ำยางกันบ่อพักก่อนบั่นน้ำยางชั้น หรือน้ำยางสดที่มีคุณภาพไม่เหมาะสมที่จะนำไปบั่น) เมื่อได้ก้อนยางจับตัวแล้ว จึงนำไปผ่านการตัดย่อย อบอัดแห้งเป็นskimบล็อก หรือนำก้อนยางจับตัวไปเข้าเครื่องเครพ ริดเครพ ผึ่งแห้ง อัดก้อนเป็นskimเครพ

การผลิตน้ำยางชั้น

ปกติน้ำยางสดจากสวน จะมีปริมาณเนื้อยางแห้งเพียง 25 - 45 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นส่วนใหญ่เป็นน้ำ และมีสารของแข็งที่ไม่ใช่ยางบ้าง ฉะนั้นหากต้องการนำน้ำยางไปใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ไกลจากสวนยาง หรือจากแหล่งยางธรรมชาติ จึงเป็นการไม่สะดวก นอกจากนั้น สารต่างๆบางอย่างที่มีอยู่ในน้ำยาง ยังอาจมีผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางไม่ดีอีกด้วยเหตุผลเหล่านี้ คือที่มาของการทำน้ำยางสด ให้เป็นน้ำยางที่มีความชื้น คือ มีปริมาณเนื้อยางแห้งเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความชื้นที่มีความเหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

วิธีการผลิตน้ำยางชั้นที่ทำกันในเชิงการค้ามี 3 วิธี คือ วิธีระเหยน้ำ (evaporation), วิธีทำให้เกิดครีม (creaming), วิธีบั่น (centrifuging) และอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถทำเป็นการค้าได้ เพราะไม่สะดวกและลงทุนสูง คือ การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electrodecantation)

วิธีการบั่น เป็นวิธีใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตน้ำยางชั้น สำหรับในประเทศไทย ปัจจุบัน ทำการผลิตน้ำยางชั้น โดยวิธีการบั่นเพียงอย่างเดียว

1 กรรมวิธีการบ่มน้ำยางชั้น

โรงงานผลิตน้ำยางชั้นจะต้องจัดหาน้ำยางสดจากสวน การรวบรวมน้ำยางจากสวนจะโดยวิธีใดๆก็ตาม ข้อสำคัญที่ต้องคำนึงถึงและถือปฏิบัติ คือ การรักษาความสะอาด การใช้สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางอย่างถูกต้องและพอเพียง ปกติจะใช้แอมโมเนียอย่างเดียว หรือร่วมกับสารช่วย เช่น tetramethyl thiuram disulphide (TMTD) กับ zinc oxide (ZnO) ควรนำน้ำยางที่รวบรวมได้ เข้ากระบวนการผลิตให้เร็วที่สุด จึงจะได้ผลผลิตที่มีคุณภาพดี เมื่อนำน้ำยางเข้าโรงงานแล้วจะถ่ายลงถังรวม เก็บตัวอย่างตรวจสอบปริมาณเนื้อยางแห้ง และปริมาณกรดไขมันได้ ตลอดจนปริมาณธาตุแมกนีเซียม เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับสมบัติน้ำยางสดให้เหมาะสมต่อไป ในทางปฏิบัติ โรงงานจะปล่อยให้ น้ำยางตกตะกอนธาตุแมกนีเซียมแล้วเติมด้วย diammonium hydrogen phosphate (DAHP) ใช้เวลา 1 วัน ในการตกตะกอนดังกล่าว ต่อจากนั้น จะใส่น้ำยางออกจากถังเก็บ สูการบ่มด้วยเครื่องบ่ม ซึ่งน้ำยางที่ออกจากเครื่องบ่มส่วนหนึ่ง คือ น้ำยางชั้นที่ต้องการ และอีกส่วนหนึ่ง คือ หางน้ำยาง ซึ่งยังคงมีปริมาณเนื้อยางอยู่บ้าง ประมาณไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ หางน้ำยางนี้ถูกนำไปผลิตเป็นยางสกิม

2 การรักษาสภาพน้ำยางชั้น

น้ำยางชั้นที่ผลิตได้ จะต้องเติม หรือปรับแอมโมเนียรักษาสภาพน้ำยาง ปกติมีวิธีการรักษาชั้นน้ำยาง 2 วิธี คือ

1 รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียมาก ประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์ (ต่อน้ำหนักน้ำยาง) เรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า HA (High Ammonia)

2 รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียน้อย ประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ (ต่อน้ำหนักน้ำยาง) และมีสารช่วยบางชนิด เช่น TMTD/ ZnO เรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า LA (Low Ammonia)

3 สมบัติน้ำยางชั้น

สมบัติที่ใช้ระบุน้ำยางชั้น คือ

- 1 ปริมาณสารของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)
- 2 ปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC)
- 3 ความเป็นด่าง (alkalinity, %NH₃)
- 4 เวลาความคงตัวต่อเครื่องมือกล (mechanical stability time, MST)
- 5 จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acid number, VFA No.)
- 6 จำนวนโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide number, KOH No.)
- 7 ปริมาณก้อนยางจับตัว (coagulum content)

8 ปริมาณตม (sludge content)

9 กลิ่น และสี



รูปที่ 2.9 แสดงผังการผลิตน้ำยางข้น โดยใช้เครื่องปั่น

ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2534

วิธีการทดสอบน้ำยางชั้นโดยทั่วไป จะยึดหลักการตามวิธีที่ องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศกำหนดไว้

ตารางที่ 2.4 แสดงการกำหนดขีดจำกัดของสมบัติน้ำหนักรยางชั้น ที่ผลิตจากวิธีการปั่น (ตามมาตรฐาน ISO 2004-1979 (E))

สมบัติ	ขีดจำกัด		
	ชนิด HA	ชนิด LA	ชนิด XA
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (% ต่ำสุด)	61.5	61.5	61.5
ปริมาณเนื้อยางแห้ง (% ต่ำสุด)	60.0	60.0	60.0
ปริมาณของแข็งที่ไม่ใช่เนื้อยาง (% สูงสุด)	2.0 (ต่ำสุด)	2.0 (สูงสุด)	2.0(ต่ำสุด)
เวลาความคงตัวต่อเครื่องกล (วินาที, ต่ำสุด)	650.0	650.0	650.0
ปริมาณของโคแอกกูลัม (% สูงสุด)	0.05	0.05	0.05
ปริมาณธาตุทองแดง (มก./กก. ของปริมาณของแข็งทั้งหมด, สูงสุด)	8.0	8.0	8.0
ปริมาณแมงกานีส (มก./กก. ของปริมาณของแข็งทั้งหมด, สูงสุด)	8.0	8.0	8.0
ปริมาณตะกั่ว (% สูงสุด)	0.1	0.1	0.1
จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (VFA No., สูงสุด)	ตามที่ตกลงกันระหว่างผู้ผลิตและผู้ใช้ แต่ต้องไม่สูงเกินกว่า 0.20		
จำนวนโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH No., สูงสุด)	ตามที่ตกลงกันระหว่างผู้ผลิตและผู้ใช้ แต่ต้องไม่สูงเกินกว่า 1.0		
การตรวจจุดสีด้วยสายตา	ไม่เป็นสีฟ้า หรือสีเทา		
การตรวจจุดกลิ่นภายหลังการทำให้เป็นกลางโดยกรดบอริก	ไม่มีกลิ่นเน่าบูด		

4 น้ำยางคงรูปหรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (prevulcanised latex or vulcanised latex)

น้ำยางคงรูป หรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ เป็นน้ำยางที่โมเลกุลยางได้เกิดพันธะเคมี อันเนื่องมาจากการให้ความร้อนกับน้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีที่จำเป็นไว้แล้ว

วิธีการผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ประกอบด้วยการนำน้ำยางข้น หรือน้ำยางสด มาผสมกับสารเคมีในระบบทำใหยางคงรูป (vulcanising system) ซึ่งประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยา เช่น zinc diethyl dithiocarbamate (ZDC) และซัลเฟอร์ พร้อมทั้งสารระบบช่วยความคงตัว

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสูตรการทำน้ำยางคงรูป

ที่มา : วราภรณ์ ขจรไชยกุล, 2534

สารต่างๆ	ส่วนโดยน้ำหนัก (เป็ยก)
น้ำยางข้นรักษาด้วยแอมโมเนียมาก	167
ซิงค์ออกไซด์	}
ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาบาเมต	
ซัลเฟอร์	
โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (10 %)	
สารช่วยความคงตัว (10 %) เช่น โปแตสเซียมลอลเลต	2

* ในรูปดิสเพิสชันหยาบ 50 %

ตัวอย่างสูตรตามตารางที่ 2.5 ให้ความร้อนกับ น้ำยางที่ผสมเคมีแล้วที่อุณหภูมิประมาณ 70 – 80 องศาเซลเซียส เวลา 2 1/2 ชั่วโมง ตรวจสอบสถานะการคงรูปของน้ำยางโดยทดสอบการจับตัวของน้ำยางด้วยคลอโรฟอร์ม เมื่อได้สถานะการคงรูปตามต้องการ ซึ่งปกติสังเกตจากก้อนยางจับตัวมีลักษณะเป็นก้อนนิ่มเหนียวเล็กน้อย ทำให้เย็น ตรวจสอบคุณภาพ ถ้าใช้น้ำยางสดทำน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ เมื่อได้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ต้องการแล้วจะนำเข้าเครื่องปั่นทำให้เข้มข้นประมาณ 58 – 60 เปอร์เซนต์ และถ้าใช้น้ำยางข้นทำน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ เมื่อปฏิกิริยาการทำพรีวัลคาไนซ์ได้ตามต้องการแล้ว จะทำการกรองน้ำยาง เพื่อแยกสารเคมีที่เหลือและแยกยางที่อาจจับเป็นฝ้าที่ผิวออก น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ดีสามารถเก็บไว้ใช้งานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 6 เดือน

คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

คุณสมบัติของยางธรรมชาติ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.6

1 Tensile Strength

ยางธรรมชาติ เป็นสารประกอบของไอโซพรีนต่อกันอย่างเป็นระเบียบ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ยางแห้งก่อนที่จะใช้งานต้องมีการนวด (masticate) เสียก่อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีความเป็นระเบียบสูงทำให้ยางธรรมชาติตกลึกได้ง่ายเมื่อยืด ผลึกที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเสริมความแข็งแรงของยาง ทำให้ยางธรรมชาติแข็งแรงโดยตัวมันเอง ทำให้การออกสูตรยางไม่ต้องใช้ตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ เช่น เชม่าดำ เข้าช่วยหรือถ้าใส่ก็เลือกชนิดตัวเติมเสริมประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อยกับตัวเติมทั่วไป ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและทนทาน

การออกสูตรยางธรรมชาติโดยไม่ใส่ตัวเติมใดๆ จะให้ยางที่มีความสามารถยืดได้สูง และมีโมดูลัสต่ำ ยืดยางได้ง่าย ความสามารถในการยืดสูงราว 700 - 800 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการยืด (tensile strength) ประมาณ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คุณสมบัติของยางธรรมชาติเหนือกว่ายางอื่นๆ โดยมาก เช่น ยาง SBR หรือยาง NRB ซึ่งจะใช้งานไม่ได้เลยถ้าไม่ใช้ตัวเติม เช่น เชม่าดำหรือซิลิกา เป็นต้น

2 Tear strength

อนึ่งเนื่องจากการตกลึกของยางนี้ ทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดได้สูงมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง เช่น ในการแกะยางธรรมชาติออกจากเบ้า จะมีปัญหาเรื่องยางขาดน้อยมาก ไม่เหมือนกับยาง SBR ที่ฉีกขาดง่ายเมื่อร้อน ข้อนี้เป็นข้อสำคัญที่พบว่า การทำกระเป๋าน้ำร้อนต้องยืดยางออกจากแกนอย่างมาก ในขณะที่แกะออกจากเบ้าที่ร้อน ซึ่งกระเป๋าดังกล่าวต้องทำมาจากยางธรรมชาติ

3 Abrasion resistance

ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกหรอดีพอใช้แต่ยังด้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย เช่น ในกรณีที่ทำดอกยางรถโดยสารธรรมดาซึ่งเป็นยางชนิดบาง มักจะใช้ยาง SBR หรือ SBR ปนกับ NR ที่จริงแล้วยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกหรอสูงมาก ดังแสดงต่อไปนี้

กลุ่ม 1 ดีมาก urethane, butadiene, SBR และยางธรรมชาติ

กลุ่ม 2 ดี-ดีมาก EPDM, chloroprene, nitrile, hypalon

กลุ่ม 3 ดี butyl, ethylene/acrylic elastomer, vinyl acetate-ethylene elastomer

กลุ่ม 4 เลว silicone, thiokol



ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของยางธรรมชาติ

ที่มา : Harper, 1975

Properties	
Physical properties	
Specific gravity	0.93
Thermal conductivity, Btu/ (hr.sq.ft.)(F/ft)	0.082
Coefficient of thermal expansion, 10 – F	37
Electrical insulation	good
Flame resistance	poor
Minimum, recommended service temp, F	– 60
Maximum, recommended service temp, F	180
Mechanical properties	
Tensile strength, lbf/ sq.in.	2500 – 3500
Elongation, %	750 – 850
Hardness (durometer)	A 30 – 90
Tear resistance	Excellent
Abrasion resistance	Excellent
Chemical resistance	
Sunlight aging	Poor
Oxidation	Good
Heat aging	Good
Solvents	
Aliphatic hydrocarbons	Poor
Aromatic hydrocarbons	Poor
Oxygenated, alcohols	Good
Oil, gasoline	Poor
Animal, vegetable oils	Poor to Good
Acids	Poor to Good
Permeability to gases	Low
Water – swell resistance	Fair

4 ความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

ยางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงมากถึง 10^{15} ohm cm ดีมากที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้อย่างดี

5 Aging

ยางธรรมชาติที่บางๆ จะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ต้องใส่แอนติออกซิแดนท์ช่วยป้องกันการเสื่อมนี้ นอกจากนั้นผิวของยางไม่ทนทานต่อโอโซนด้วย ทำให้เกิดรอยแตกได้ง่ายเมื่อยืด แต่สำหรับยางหนาๆแล้ว ออกซิเดชันจะไม่เข้าไปถึงส่วนในของยาง ทำให้ยางภายใต้ผิว 2-3 มิลลิเมตร เข้าไป จะยังคงสภาพดีอยู่เมื่อใช้ไปนานๆ ดังนั้นในการใช้งานบางประเภทที่ต้องการใช้งานเป็นเวลานานๆ เช่น ในกรณีของยางรองสะพาน (bridge bearing) ซึ่งยางต้องใช้มากกว่า 20 ปีขึ้นไป การใช้อายุธรรมชาติก็จะเหมาะสมมากเพราะจากการใช้งานที่ผ่านมา พบว่า ยางดังกล่าวที่ทำจากยางธรรมชาติยังใช้งานได้ดีเมื่อผ่านเวลาดังกล่าวแล้ว

6 ความทนทานต่อสารเคมี

ยางธรรมชาติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่มีความทนทานต่อของเหลวที่มีขี้ผึ้ง เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ ได้ดี ยางธรรมชาติทนต่อกรดเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกเข้มข้น และกรดกำมะถันเข้มข้น

7 อุณหภูมิที่ใช้งาน

ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -70 องศาเซลเซียส จนถึง 70 องศาเซลเซียส โดยที่ยางทั่วไปจะแข็งตัวเมื่อเย็น จนยืดไม่ได้ และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป ค่า tensile strength จะต่ำลง ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของยาง ได้แสดงในรูปที่ 2.10

8 Resilience

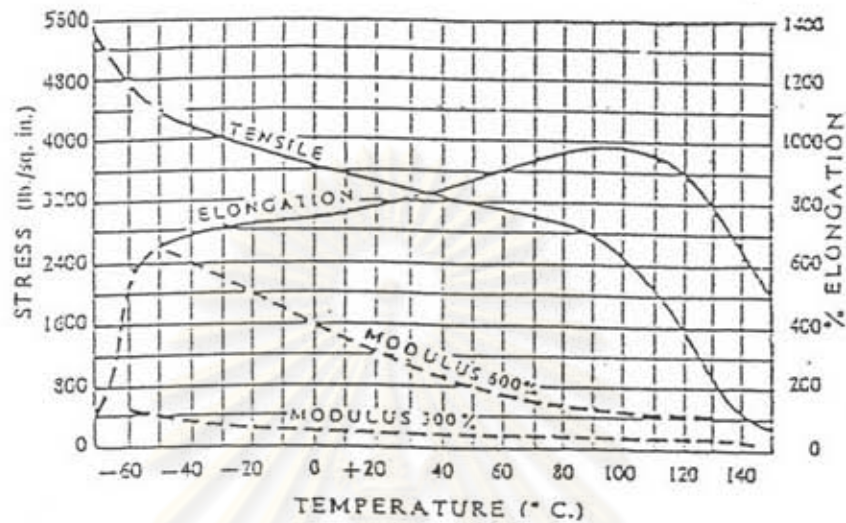
ยางธรรมชาติมีความกระด้างตัวสูง มี heat build up ต่ำ (ต่ำกว่ายาง SBR) ทำให้ยางธรรมชาติจึงนิยมในการใช้ทำยางรถบรรทุก ซึ่งต้องรับงานหนัก เกิดความร้อนสูงได้ง่ายถ้ายางไม่ดี

9 Tack

ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติติดกันเองได้ดี ทำให้สามารถทำผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีหลายชิ้นส่วนประกอบกันได้ดี เช่น ในกรณีของยางรถยนต์ เป็นต้น ยางสังเคราะห์บางอย่าง เช่น EDPM นี้มี tack ไม่ดี ไม่อาจจะทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหลายชิ้นส่วนได้

10 ราคา

ยางธรรมชาติมีราคาถูก ทำให้เหมาะแก่การนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง



รูปที่ 2.10 แสดงผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ
ที่มา : บุญธรรม นิธิอุทัย, 2530

นอกจากเนื้อยางที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน องค์ประกอบภายในเนื้อยางแห้ง เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมยางแล้ว พบว่าองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้มีปริมาณลดลง ส่วนที่เหลืออยู่ส่วนใหญ่เป็นไขมันและโปรตีน รวมทั้งเกลืออนินทรีย์อีกปริมาณเล็กน้อย ไขมันที่พบประกอบด้วย โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ สเตอรอยด์ เอสเทอร์ของสเตอรอยด์ โทโคไตรอีนอล กรดไขมันและฟอสโฟไลปิด ซึ่งองค์ประกอบที่ไม่ใช่เนื้อยางบางชนิดจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติด้วย ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.7 แสดงอิทธิพลของสารต่างๆ ต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ

ที่มา : Maurice, 1988

Properties	Influence of Nonrubbers
Latex stability	Carbohydrates act as substrates for bacterial growth – lead to increased volatile acid formation and lower stability.
Colour	Yellow – caused by β – carotenes. Dark – enzymic reation of polyphenol oxidase.
Cure	Phospholipids and some proteins are natural accelerator ; fatty acids are activators
Oxidation	Tocotrienols are natural antioxidants. Cu,Mn and Fe ions are pro – oxidants
Storage hardening	Proteins and free amino acids react with abnormal groups in rubber
Crystallization	Unstrained crystallization rate increased by stearic acid, some water – soluble substances retard rate.
Creep and stress relaxation	High contents of proteins and ash lead to moisture absorption, which results in high creep and stress relaxation in vulcanizates.
Modulus	Increased by proteins.
Filler effect	Proteins act as fillers. One part of protein is equivalent to 3 parts of HAF black.
Heat build – up	Heat build – up in the Goodrich flexometer test is decreased by fatty acid and increased by proteins.
Tear strength	Increased by proteins.
Dynamic crack growth	Resistance increased by proteins.

การใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติ

1 ยางแห้ง

การใช้ยางธรรมชาติในงานผลิตผลิตภัณฑ์ ล้อยานพาหนะ และอะไหล่ จะมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาเป็นการใช้ในงานชิ้นส่วนเครื่องกล รองเท้า และส่วนประกอบของรองเท้า และผลิตภัณฑ์อื่นๆ

ชนิดของยางแห้งที่ใช้ในปริมาณมากที่สุด คือ ยางแผ่นรมควันชั้น 3 รองลงมา คือ ยางแท่งที่.ที.อาร์.20 ยางแผ่นรมควันชั้นอื่นๆ ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ ยางแท่งที่.ที.อาร์.ชั้นอื่นๆ ตามลำดับ ยางแผ่นรมควันชั้น 2, 3, 4 และ 5 ใช้มากในงานผลิตยางล้อยานพาหนะ และยางชิ้นส่วนอะไหล่ ส่วนยางคุณภาพดี เช่น ยางที่.ที.อาร์. 5 แอล ยางเครพสีจาง ยางแผ่นผึ่งแห้ง จะใช้มากในงานการผลิตผลิตภัณฑ์ใช้ในการแพทย์ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการใส่สีสรรต่างๆ ส่วนงานผลิตพวกผลิตภัณฑ์ยางใช้ในงานเครื่องกล ท่อยาง รองเท้ายาง มักใช้ยางที่.ที.อาร์. 20, 50 หรือ เครพสีน้ำตาล หรือยางแผ่นรมควันชั้น 1 - 5 และยางสกิมจะใช้ในงานผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพต่ำ เช่น พื้นรองเท้า ยางปูพื้น ยางล้อเลื่อน เป็นต้น

2 น้ำยางชั้น

ผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้น้ำยางชั้นในกระบวนการผลิต ได้แก่

1 ผลิตภัณฑ์จุ่มแบบพิมพ์ (latex dipping) ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ ถุงมือต่างๆ เช่น ถุงมือผ่าตัด ถุงมือตรวจ ถุงมือใช้ในบ้าน ถุงมืออุตสาหกรรม ลูกโป่ง ยางอนามัย หัวนมยาง เป็นต้น

2 ผลิตภัณฑ์น้ำยางในอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมพรมในปัจจุบันได้ใช้น้ำยางมาก เช่น ในพรมที่เรียกว่า tufted carpet จะใช้น้ำยางอาบหลังพรมเพื่อที่จะยึดเส้นพรมเอาไว้ ชั้นน้ำยางที่ใช้ยึดนี้ เรียกว่า anchor coat

- ใช้ในการยึดกระสอบให้ติดกับหลังพรม ขบวนการนี้ เป็นการทำให้ secondary backing เพื่อทำให้ tufted carpet มองดูเหมือนพรมที่ทอถัก เช่น พรมแบบ Wilton และพรม Axminsters เป็นต้น

- ใช้ทำเป็นฟองน้ำเคลือบด้านหลังของพรม (carpet backing) ทำให้เมื่อเดินบนพรมดังกล่าว จะรู้สึกนุ่มเหมือนกับพรมที่ทอหนาและราคาแพง

3 ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ (latex foam) ใช้ทำ ที่นอน หมอน เบาะรองนั่ง เป็นต้น

4 สายยางยึด (latex thread) เช่น ยางยึดขอบกางเกง ถุงเท้า ยางรัดขาไก่ เป็นต้น

5 พุกโยชนสัตว์ และกามมะพร้าว จะใช้น้ำยางเป็นตัวยึดขนสัตว์ หรือเส้นใยใบกามมะพร้าวเหล่านี้เอาไว้

6 ท่อยาง สายน้ำเกลือ

7 กาว น้ำยางประกบผ้า ในอุตสาหกรรมรองเท้า และเสื้อผ้า

8 ผลิตภัณฑ์หล่อเข้าพิมพ์ (casting) เช่น ตุ๊กตา หน้ากาก หุ่นต่างๆ เป็นต้น

3 น้ำยางคงรูป

ใช้ในงานผลิตภัณฑ์น้ำยางพวงจุ่มแบบ เช่น ถุงมือใช้งานต่างๆ ผลิตภัณฑ์หล่อเข้าพิมพ์ หัวนมสำหรับทารก กาวเชื่อมเส้นใยเคลือบงานประดิษฐ์ดอกไม้ ผลไม้ เป็นต้น

การจำแนกประเภทของโพลิเมอร์ (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2527)

ในปัจจุบัน จะเห็นได้ว่าสิ่งของเป็นจำนวนมาก เช่น เสื้อผ้า กระดุม ปากกา ลูกชิ้น ไม้บรรทัด กระเบื้องยางปูพื้น ถุงพลาสติก ยางรถยนต์ ฯลฯ สิ่งของเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำจากวัตถุที่เรียกว่า โพลิเมอร์ (polymer) และสิ่งของเหล่านี้เป็นจำนวนมากเราไม่เคยเห็นหรือรู้จักมาก่อนจนกระทั่ง 70 ปีหลังนี้เอง สิ่งเหล่านี้ไม่มีในธรรมชาติกล่าวคือ ล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่มนุษย์เราทำขึ้นหรือสังเคราะห์ขึ้น วัตถุโพลิเมอร์ที่เราสังเคราะห์ขึ้นนี้ เรียกว่า โพลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) ส่วนโพลิเมอร์ที่มีในธรรมชาติก็มี เช่น ยางธรรมชาติ แป้ง (มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ) เส้นผม ขนสัตว์ เป็นต้น

คำว่าโพลิเมอร์ มาจากคำกรีกสองคำคือ poly แปลว่า หลายๆหรือมาก และ mer แปลว่า หน่วยหรือส่วน ดังนั้นโพลิเมอร์จึงเป็น สารที่มีโมเลกุลยาวมาก และโมเลกุลเหล่านี้ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำๆกัน (repeating unit) เป็นจำนวนมาก

ถ้าพิจารณาจากชนิดของหน่วยที่ซ้ำๆ กันในโซ่โพลิเมอร์ อาจจำแนกโพลิเมอร์ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1 โฮโมโพลิเมอร์ (homopolymer) ได้แก่ โพลิเมอร์ซึ่งในโซ่โพลิเมอร์มีหน่วยที่ซ้ำๆ กันเพียงชนิดเดียวเท่านั้น

2 โคโพลิเมอร์ (copolymer) ได้แก่ โพลิเมอร์ซึ่งในโซ่โพลิเมอร์มีหน่วยที่ซ้ำๆ กัน 2 ชนิดหรือมากกว่าสองชนิด

โคโพลิเมอร์ที่มีหน่วยที่ซ้ำๆ กันสองชนิด ยังอาจแบ่งตามลักษณะการจัดหน่วยที่ซ้ำๆ

กันโมโนเมอร์ออกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

1 โคโพลิเมอร์แบบแรมดัม (random copolymer) โคโพลิเมอร์ประเภทนี้มีหน่วยที่ซ้ำๆ กันทั้งสองชนิดในโซโพลิเมอร์อยู่ หรือจัดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (random แปลว่าไม่เป็นระเบียบ) ถ้าให้ A และ B แทนหน่วยที่ซ้ำๆ กัน 2 ชนิด โซโครงสร้างของโพลิเมอร์ชนิดนี้อาจแสดงได้ดังนี้



random copolymer

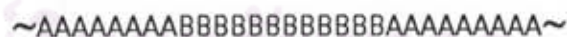
จะเห็นว่าหน่วยที่ซ้ำๆ กัน 2 ชนิดคือ A และ B จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในโซโพลิเมอร์

2 โคโพลิเมอร์แบบสลับ (alternating copolymer) โคโพลิเมอร์ประเภทนี้มีหน่วยที่ซ้ำๆ กัน 2 ชนิดคือ A และ B อยู่สลับกันไปเรื่อยๆ ในโซโพลิเมอร์ ดังนี้



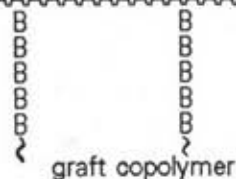
alternating copolymer

3 บล็อกโคโพลิเมอร์ (block copolymer) โคโพลิเมอร์ประเภทนี้มี A หลายๆ หน่วยอยู่เรียงกันเป็นแถวตามด้วย B หลายๆ หน่วย เรียงกันเป็นแถว และตามด้วย A อีก ดังนี้



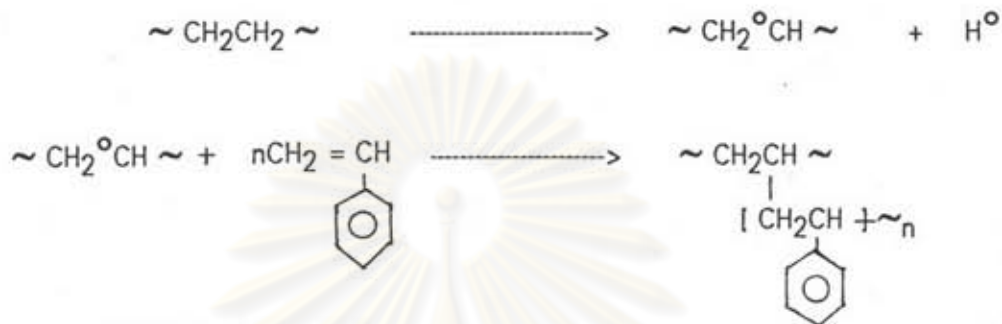
block copolymer

4 กราฟต์โคโพลิเมอร์ (graft copolymer) โคโพลิเมอร์ชนิดนี้มีโมโนเมอร์ A เรียงกันเป็นแถวยาวและในระหว่างแถวมีโมโนเมอร์อีกชนิดหนึ่งคือ B แตกสาขา เป็นแถวยาวออกไป ดังนี้



1.2 Ionizing radiation

ในการผลิตโพลิเมอร์ที่ใช้รังสีเป็นตัวกระตุ้น ในระบบที่มีโพลิเมอร์และโมโนเมอร์ อยู่ด้วยกัน จะเกิดโพลิเมอริกแรดิคอล สลับกับไอออนไนซิงแรดิคอล ตัวอย่างเช่น การกราฟต์ ของ โพลิเอทีลีน กับ สไตรีน โมโนเมอร์



1.3 Ultraviolet radiation

ปฏิกิริยากราฟต์โคโพลิเมอไรเซชัน สามารถทำให้เกิดขึ้นโดยการใช้อัลตราไวโอเล็ต ในระบบที่มี โพลิเมอร์ และโมโนเมอร์ อยู่ด้วยกัน โดยทั่วไปมักจะใช้เบนโซควิโนน หรือ เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวเริ่มต้นในปฏิกิริยา และนิยมใช้ปฏิกิริยานี้ในการปรับปรุงพื้นที่ผิว ของโพลิเมอร์

1.4 Redox initiation

ปฏิกิริยาที่เริ่มด้วยตัวเริ่มต้นรีดอกซ์ มักจะเป็นขบวนการที่เฉพาะเจาะจง สำหรับปฏิกิริยากราฟต์โคโพลิเมอไรเซชัน ของโพลิเมอร์ที่มีไฮดรอกซิลกรู๊ปอยู่ เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์, เซลลูโลส และแป้ง ภายใต้ปฏิกิริยารีดอกซ์ กับเซริกไอออน หรือออกซิไดซิงเอเจนต์ตัวอื่นๆ เกิดเป็นโพลิเมอร์แรดิคอล ที่ส่วนปลายเป็นส่วนเริ่มต้นของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันต่อไป



ปฏิกิริยา รีดอกซ์อินิทิเอชัน มักจะให้ผลผลิตที่เป็นกราฟต์ต่ำมาก ในปฏิกิริยาแบบไฮโมโพลิเมอไรเซชัน เนื่องจากการเกิดโพลิเมอริก แรดิคอล อย่างไรก็ตามขีดจำกัดในการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กั้กับหมู่ที่จะเข้าทำปฏิกิริยาของโมโนเมอร์ด้วย

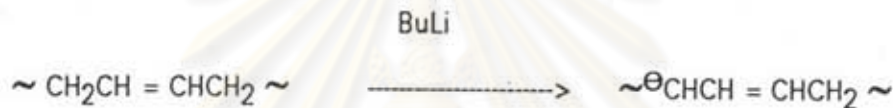
2 ไอออนิก กราฟต์โคโพลิเมอไรเซชัน (ionic graft copolymerization)

ในปฏิกิริยาไอออนิก กราฟต์โคโพลิเมอไรเซชัน จะใช้โมโนเมอร์ที่สามารถทำปฏิกิริยาแบบนี้ ได้แก่ อัลคีน, คาร์บอนิล, และไซคลิกโมโนเมอร์ อย่างไรก็ตาม มีความยุ่งยากในการพิจารณาถึงการเกิดแบบ แอนไอออนิก และแคตไอออนิก ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเลือกชนิดของตัวเริ่มต้นให้เหมาะสม

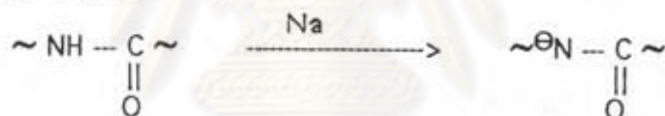
ปฏิกิริยาไอออนิก กราฟต์โคโพลิเมอร์ สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด

2.1 ตัวเริ่มต้นแบบแอนไอออนิก (Anionic initiation)

เป็นปฏิกิริยาของโพลิเมอร์ที่ถูกกระทำด้วยสารที่เป็นเบสแก่ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาของ 1,4-บิวทาไดอีน กับ BuLi



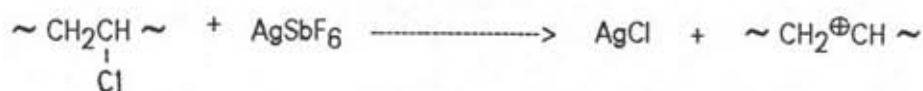
หรือ โพลีเอไมด์ กับ โซเดียม

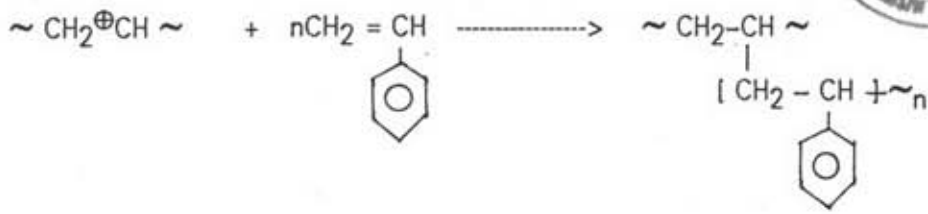


โพลิเมอร์ิก แอนไอออนิก ที่ได้ในแต่ละกรณีสามารถเป็นตัวเริ่มต้นในการเกิดกราฟต์โคโพลิเมอไรเซชันกับโมโนเมอร์ต่อไปได้ เช่น สไตรีน, ฟอร์มัลดีไฮด์, อะคลิไลไนไตรด์ และเอทิลีนออกไซด์

2.2 ตัวเริ่มต้นแบบแคตไอออน (Cationic initiation)

โพลิเมอร์ิก คาร์โบเนียมไอออน ที่เคยพบในปฏิกิริยาของโพลิเมอร์ที่มีคลอรีนอยู่ ตัวอย่างเช่น โพลีไวนิลคลอไรด์, คลอโรเมทิลเลท, โพลีสไตรีน และคลอรีเนเตด โพลีบิวทาไดอีน กับ AlCl_3 , BCl_3 , R_2AlCl หรือ AgSbF_4 ดังแสดงในตัวอย่าง



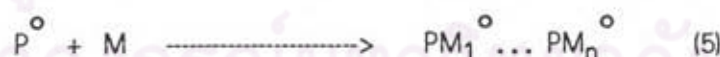
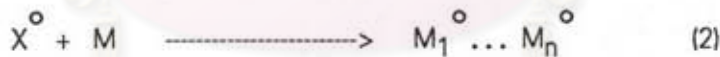


โพลีเมอร์ คาร์โบเนียมไอออน สามารถเป็นตัวเริ่มต้นของปฏิกิริยา กราฟต์โคโพลิเมอร์ เซ็นของไอโซบิวทิลีน, เตตระไฮโดรฟูราน และโมโนเมอร์ตัวอื่นๆ

น้ำยางกราฟต์โคโพลิเมอร์ (Graft-copolymer latices) (บุญธรรม นิธิอุทัย, 2530)

วิธีการหลักที่ทำการกราฟต์โคโพลิเมอร์ได้ คือการโพลิเมอร์ไรโซไมโนเมอร์ชนิดไวนิล โดยกลไกแบบแรดิคอลอิสระ (free radical) ภายในน้ำยางที่เป็นโพลิเมอร์ซึ่งมาจากโมโนเมอร์ชนิดอื่นๆ

จากการศึกษาพบว่า จะได้ผลการทดลองดี เมื่อทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรโซเกิดขึ้นในอนุภาคของน้ำยางที่บวมหรือพอง ด้วยการเติมโมโนเมอร์ลงไป โดยปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรโซจะเกิดขึ้นที่ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาของแรดิคอลอิสระเคลื่อนไปเกาะที่โพลิเมอร์ ปฏิกิริยาโดยทั่วไปที่ก่อให้เกิดโพลิเมอร์ไรโซและกราฟต์โคโพลิเมอร์ อาจแสดงได้ ดังนี้



- โดย
- X° - คือแรดิคอลที่มาจากตัวตั้งต้น
 - M - คือโมโนเมอร์ที่จะเกิดโพลิเมอร์ได้
 - P - คือโมเลกุลของโพลิเมอร์

การกราฟต์โคโพลิเมอร์ในโพลิเมอร์ที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ นั้น ปฏิกิริยาระหว่างแรดิคอกับโพลิเมอร์จะเกิดอย่างน้อยสองแบบคือ

- เกิดขึ้นที่พันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอน
 - เกิดขึ้นที่ไฮโดรเจนอะตอมที่ไม่มีความเสถียรได้แก่แอลฟา-เมทิลไฮโดรเจนอะตอม
- ปฏิกิริยาดังกล่าว มีดังนี้

1 Addition



2 Hydrogen abstraction



โพลิเมอร์แรดิคอกที่เกิดขึ้นจะเป็นผลให้เกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ต่อไป

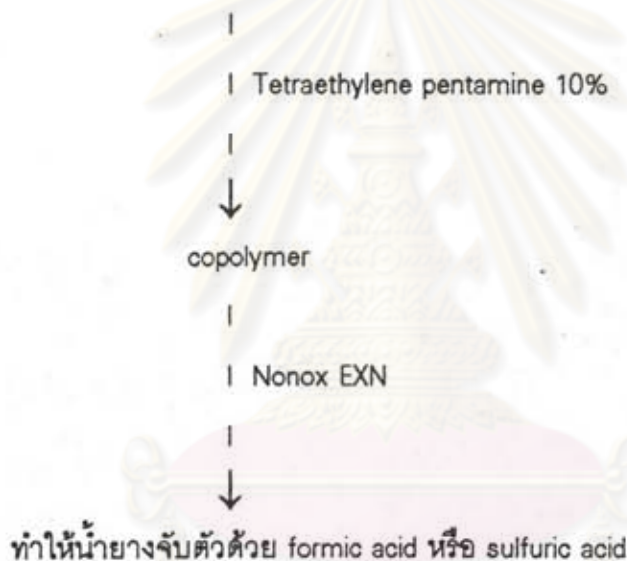
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยางเอ็มจี (MG – Methyl Methacrylate Graft Rubber or Hevea plus MG rubber)

ยางเอ็มจี เป็นโคโพลิเมอร์ชนิดที่เมทิลเมทาคริเลต เชื่อมหรือกราฟต์กับยางธรรมชาติ โดยใช้ยางธรรมชาติในสถานะน้ำยางสด และใช้เมทิลเมทาคริเลต ในสถานะอิมัลชันเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดภายใต้สภาวะคอลลอยด์

1 การเตรียมยางเอ็มจี

emulsion ของ MMA (monomer:water=2:1) ที่มี cumene hydroperoxide+น้ำยางสด



รูปที่ 2.11 แสดงการเตรียมยางเอ็มจี
ที่มา : บุญธรรม นิธิอุทัย, 2530

2 คุณสมบัติของยางเอ็มจี

จะแสดงคุณสมบัติทั้งของยางธรรมชาติและเมทิลเมทาคริเลตดังนี้

- ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ (self-reinforcing rubber)
- ใช้เป็นกาวยางเพื่อเชื่อมหรือติดยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์กับพีวีซี หรือเส้นใยสังเคราะห์ หรือพวกหนัง โลหะ ยางอื่นๆ
- เพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical resistance)

ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์

ในการเกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ จะใช้ค่าปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ (grafting efficiency) เป็นการบอกปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของโพลิเมอร์ทั้งสองสำหรับผลิตภัณฑ์นั้นๆ ค่าปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์นี้ หาได้จากสมการ

$$\text{Grafting Efficiency} = \frac{c}{a + b + c} \quad (2.9)$$

a = น้ำหนักของโพลิเมอร์ที่ไม่เกิดการกราฟต์, กรัม

b = น้ำหนักของโฮโมโพลิเมอร์ที่ได้หลังจากการกราฟต์, กรัม

c = น้ำหนักของกราฟต์โคโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้น, กรัม

โดย a, b และ c เป็นปริมาณโดยน้ำหนักขององค์ประกอบในการเกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ ซึ่งสามารถหาได้โดยวิธีแยกออกจากผลิตภัณฑ์ ค่าปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์นี้นิยมบอกค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ หรือเรียกว่า เปอร์เซ็นต์จีอี (%GE) ซึ่งหาได้จากสมการ 2.9 คูณด้วย 100

ซาคุราดาและคณะ (Sakurada, 1970) ศึกษาเทคนิคการแยกปริมาณองค์ประกอบการกราฟต์โคโพลิเมอร์ ออกจากยางธรรมชาติ โดยแบ่งออกได้ 3 วิธีดังนี้

- 1 แยกโดยวิธีการสกัด
- 2 แยกโดยวิธีตกตะกอน
- 3 แยกโดยวิธีการสกัดและตกตะกอน

โดยอาศัยหลักการเลือกตัวทำละลายที่มีคุณสมบัติการละลายที่ต่างกัน เนื่องจากยางผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย โพลิเมอร์ (A), โพลิเมอร์ (B) และกราฟต์โคโพลิเมอร์ (AB) ฉะนั้นในการเลือกตัวทำละลาย กรณีแยกโพลิเมอร์ (B) ออกจากผลิตภัณฑ์ จึงเลือกตัวทำละลายที่ละลายได้ดีในโพลิเมอร์ (A) และละลายในโพลิเมอร์ (B) ได้น้อยหรือไม่ละลายเลย ตัวอย่างช่วงของตัวทำละลายแสดงดังตารางที่ 2.8

ในการแยกโดยวิธีการสกัด กรณีกราฟต์โคโพลิเมอร์ของยางธรรมชาติด้วย เมทิลเมทาคริเลต จะใช้วิธีการ Soxhlet สกัดด้วยปิโตรลียมอีเทอร์กรณีที่ต้องการแยกยางธรรมชาติออก ส่วนการ

แยกโพลีเมทิลเมทาคริเลตใช้อะซิโตนในการแยก

สำหรับการแยกโดยวิธีการตกตะกอน ในกรณีกราฟต์โคโพลิเมอร์ของยางธรรมชาติด้วยเมทิลเมทาคริเลต จะแยกยางธรรมชาติออก โดยละลายยางผลิตภัณฑ์ในสารละลายผสมของเบนซินกับปิโตรเลียม-อีเทอร์ และทำให้ตกตะกอนด้วยเติมเมทานอล นำตะกอนไปอบให้แห้งซึ่งน้ำหนักและในการแยกโพลีเมทิลเมทาคริเลต ทำได้โดยละลายสารละลายที่เหลือในสารละลายผสมของเบนซินกับอะซิโตน ทำให้ตกตะกอนด้วยการเติมเมทานอล อบตะกอนที่ได้ให้แห้งแล้ว ซึ่งน้ำหนักสำหรับส่วนที่กราฟต์โคโพลิเมอร์ได้จาก การคำนวณน้ำหนักที่เหลือ

กรณีการแยกโดยวิธีอื่นๆ ได้แก่การแยกด้วยวิธีโครมาโทกราฟีที่อาศัยหลักการ การดูดซับ, การตกตะกอน เป็นต้น

ดังตัวอย่างที่ แอนเจียร์ และเทอร์เนอร์ ได้ศึกษาการกราฟต์โคโพลิเมอร์ยางธรรมชาติด้วยเมทิลเมทาคริเลต ที่ได้จากการเตรียมแบบใช้รังสีแกมมา และใช้วิธีการตกตะกอนแยกองค์ประกอบต่างๆออกได้ ผลดังตารางที่ 2.9



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 แสดงช่วงการตกตะกอนของโพลิเมอร์ชนิดต่างๆ

ที่มา : Ceresa , 1959

Polymer	Solvent	Precipitation rang(Volumes of precipitation/volume of solvent)		
		Methanol	Petroleum ether	water
Polystyrene	Benzene	0.3-0.9	1.7-2.8	
	Benzene-chlorobenzene	0.3-0.8	1.8-3.5	
	Benzene-acetone	0.15-0.5	1.7-2.8	
	Dimethyl formamide	0.3-0.7	Immiscible	0.03-0.1
	Tetrahydrofuran	0.65-1.4	2.3-3.5	
Poly(methyl methacrylate)	Benzene	1.6-3.0	0.4-0.9	
	Benzene-chlorobenzene	2.0-3.0	0.7-1.1	
	Benzene-acetone	1.8-3.3	0.5-0.95	
	Dimethyl formamide	1.8-4.4	Immiscible	0.1-0.5
	Tetrahydrofuran	1.45-2.5	0.35-0.5	
	Tetrahydrofuran-acetone	2.05-3.7	0.6-1.15	
Poly(vinyl acetate)	Benzene	Not ppt.	0.45-0.9	
	Benzene-chlorobenzene	Not ppt.	0.5-1.1	
	Benzene-acetone	Not ppt.	0.85-1.6	
	Dimethyl formamide	0.4-1.2	Immiscible	0.2-0.7
	Tetrahydrofuran	0.85-1.9	0.65-1.2	
Polyacrylonitrile	Dimethyl formamide	Not ppt.	Immiscible	0.3-1.3
Poly(vinyl chloride)	Tetrahydrofuran	0.8-1.5	1.15-1.6	
	Tetrahydrofuran-acetone	0.5-0.85	1.6-4.8	
Poly(ethyl methacrylate)	Benzene	Not ppt.	1.65-2.25	
Poly(buthyl methacrylate)	Benzene	1.55-2.2	Not ppt.	
Natural rubber	Benzene	0.2-0.5	Not ppt.	
Chlorinated rubber	Methyl ethyl ketone	0.25-0.9	1.9-2.5	

ตารางที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของยางที่กราฟต์โคโพลิเมอร์ด้วยวิธีรังสีแกมมา (40 เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเมทาคริเลต)

ที่มา : Angier and Turner , 1958

system	Dose rep	conversion %	Fraction analysis (%w/w)			PMMA side chain (ml./g)
			free rubber	copolymer	freePMMA	
Extracted rubber, rate 6000rep/h	6 X10 ⁵	2.5	68	32	0	—
	10 ⁴	10.4	59	41	0	352
	2 X10 ⁴	59.4	40	60	0	363
	4 X10 ⁴	85.7	26	73	1	316
	6 X10 ⁴	92.9	20	79	1	291
	8 X10 ⁴	94.6	20	79	1	—
	10 ⁵	95.7	20	79	1	—
	4 X10 ⁵	96.2	16	81	3	—
	7 X10 ⁵	97.8	12	83	5	—
Unextracted rubber, rate 6000rep/h	10 ⁴	2.4	76	21	1	—
	2.5X10 ⁴	9.0	66	32	2	193
	5 X10 ⁴	16.9	64	34	2	—
	7.5X10 ⁴	27.4	57	41	2	234
	10 ⁴	50.3	45	47	8	390
Extracted rubber, rate 400000rep/h	2.5X10 ⁵	94.5	21	71	8	—
	6 X10 ⁴	20.6	50	49	1	165
	10 ⁵	35.7	47	53	0	294
	3 X10 ⁵	84.2	20	76	4	167
	7 X10 ⁵	99.5	10	85	5	—

งานวิจัยในอดีต

คาร์บอนไดออกไซด์

การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย ได้มีการบันทึกเป็นครั้งแรกโดยกอร์(Gore) เป็นผู้ศึกษาการละลายของไอโอดีนและเนพทาซีน

ปี 1900 เริ่มมีการจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการทางอาหาร (Schultz, 1974)

ปี 1927 เลารี (Lowry) และคณะ ได้ศึกษาการละลายของน้ำในคาร์บอนไดออกไซด์

ปี 1939 เริ่มมีการจดสิทธิบัตรการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย

ปี 1954 ฟรานซิส (Francis) มีการศึกษาการแยกไดไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (dicyclic hydrocarbons) จากอะลิฟาติก (aliphatic) และโมโนไซคลิก (monocyclic) นอกจากนี้ยังได้มีการบันทึกการละลายของสารประกอบ 261 ชนิด ในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ในปีถัดมาได้บันทึกการสกัดสารไฮโดรคาร์บอนผสม โดยการเติมตัวทำละลายร่วม (Schultz, 1970)

ซูลส์ (Schultz, 1970) บันทึกการสกัดองค์ประกอบที่มีกลิ่นหอมของผลไม้ (fruit aroma constituent) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ปีถัดมาได้เปรียบเทียบการสกัดสารที่ระเหยง่ายของแอปเปิ้ลด้วยตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ ไอโซเพนเทน (iso-pentane) ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) คาร์บอนไดออกไซด์เหลว และ 1,2 ไดคลอโร-1,1,2,2-เตตระฟลูออโรอีเทน

เฟล็ค (Fleck, 1967) ศึกษาสมดุลเฟสไตรภาค (ternary phase equilibrium) โดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลว

โซเซล (Zosel, 1978) ได้ทำการสกัดคาเฟอีนออกจากเมล็ดกาแฟได้และนำไปใช้ ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางพาณิชย์ในประเทศเยอรมัน โดยลดปริมาณคาเฟอีนลงจาก 3 -- 0.7 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 0.02 เปอร์เซ็นต์

เคอร์นิก (Kurnik, 1982) ศึกษาระละลายของสารผสมที่ประกอบด้วยของแข็ง 8 ชนิดรวมทั้งเนพทาซีนและฟีแนนทริน (phenanthrene) ในคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤต (supercritical carbon dioxide) พบว่าการละลายของสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและความสามารถในการระเหยของสารรวมทั้งความหนาแน่นของเฟสภาวะวิกฤต (supercritical phase) และคุณสมบัติเฉพาะของอันตรกิริยาทวิภาค (binary interaction) ขององค์ประกอบนั้น ในปีเดียวกัน ซิมส์ (Sims, 1982) มีการศึกษาวิจัยในการทดลองสกัดสารไพเรทริน (pyrethrin) ออกจากดอกไพเรทรัม (pyrethrum) ซึ่งสารนี้ใช้เป็นยาฆ่าแมลงที่มีพิษต่อแมลงสูงแต่ไม่มีผลต่อสัตว์เลือดอุ่นทั่วไป สามารถ

ละลายตัวได้และไม่มีการสะสมในธรรมชาติโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤต เป็นตัวทำละลาย

บรูเนอร์ (Brunner, 1983) ศึกษาผลของสารตัวที่สาม (entrainers) ที่มีต่อการละลายของ สารผสมเฮกซะเดคานอล (hexadecanol) และออกตะเดเคน (octadecane) พบว่าสารชนิดที่สามที่ ใส่ลงไปในระบบของคาร์บอนไดออกไซด์มีผลทำให้พฤติกรรมของเฟส (phase behavior) เปลี่ยนแปลง ไปอย่างชัดเจน

ไจรัม (Jairam, 1985) ศึกษาการละลายของระบบของของเหลวและของแข็งในคาร์บอน ไดออกไซด์สภาวะวิกฤต ระบบของผสมที่ศึกษา ได้แก่ ระบบของแนพทาลินกับสารพวกฟีนีลีน ฟีนอล และไบฟีนีล (biphenyl) พบว่าการละลายของสารน้ำหนักโมเลกุลหนักในไฮโดรคาร์บอนไม่ค่อย ขึ้นกับอุณหภูมิ แต่ขึ้นกับความดัน

ปี พ.ศ.2535 พรฤดี มุ่งสมานกุล ศึกษาการละลายเม็ดยางธรรมชาติด้วยคาร์บอน ออกไซด์เหลว โดยทำการทดลองที่สภาวะวิกฤต พบว่าที่บริเวณสภาวะวิกฤตนี้เม็ดยางจะบวมพอง มาก ทำให้มีผลต่อการลดลงของ ปริมาณไนโตรเจนในเม็ดยาง (พรฤดี มุ่งสมานกุล, 2535)

กราฟต์โคโพลิเมอร์

เฮเยส (Hayes, 1953) ศึกษาการกราฟต์โคโพลิเมอร์ของไวนิลอะซิเตทกับโพลีไวนิลคลอไรด์ ที่มีปริมาณโมโนเมอร์ต่างๆกัน โดยวัดค่าที่ได้ออกมาเป็นปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ซึ่งหาได้จาก

$$\text{ปริมาณการกราฟต์ (grafting efficiency)} = \frac{\text{น้ำหนักของโพลิเมอร์ที่เกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์}}{\text{น้ำหนักทั้งหมดของโพลิเมอร์}}$$

น้ำหนักโพลิเมอร์ที่เกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ หาได้จากวิธีการตกตะกอนโดยเลือกตัวทำละลาย แล้วทำให้ตกตะกอนด้วยเมทานอล ได้ผลการทดลองดังใน ตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงผลของความเข้มข้นของโมโนเมอร์ต่อปริมาณการกราฟต์ที่วัดได้
ที่มา : Hayes, R.A., 1953

Poly(vinyl chloride) p.p.h	Vinyl acetate p.p.h.	Grafting efficiency
80	20	0.40
65	35	0.57
50	50	0.59
35	65	0.71
20	80	0.90

บลอมฟิลด์ และสวิตท์ (Blomfield and Swift, 1959) ได้ศึกษาการกราฟต์โคโพลิเมอร์ของยางธรรมชาติด้วยโมโนเมอร์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธีฟรีแรดิคอลในสถานะน้ำยางที่มีโมโนเมอร์อยู่ โดยใช้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์-โพลิเอไมด์ (hydroperoxide-polyamine) เป็นตัวเริ่มต้นที่สภาวะต่างๆ ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงรายละเอียดปริมาณสารเริ่มต้นและสภาวะต่างๆในการกราฟต์โคโพลิเมอร์
ที่มา : Bloomfield and Swift, 1959

Monomer	Initiator p.p.h. of rubber		Conditions
	Hydroperoxide	Amine	
Methacrylate	0.2	0.2	Room temp., exothermic
Acrylates	0.3	0.35	6 hours, 60 °C
Styrene	0.25	0.1	6 hours, 35 °C
Acrylamide	0.2	0.2	Room temp., exothermic
Vinyl pyridine	0.2	0.2	Room temp., exothermic



โบลมฟิลด์ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่ผ่านการกราฟต์โคโพลิเมอร์
ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 แสดงคุณสมบัติวัลคาไนซ์ของยางที่ผ่านการกราฟต์โคโพลิเมอร์

ที่มา : Bloomfield ,Merrett ,Popham and Swiftt, 1954

Type	Wt %	TS(kg/cm ²)	Modulus(100%) kg/cm ²	EB %	Hardness BS	Resilience %
Poly(methyl methacrylate)	10	290	13	640	51	88
Poly(methyl methacrylate)	20	295	23	595	60	78
Poly(methyl methacrylate)	30	285	32	560	70	64
Poly(methyl methacrylate)	50	178	130	180	96	-
Polystyrene	20	252	15	648	54	73
Polystyrene	30	252	30	565	72	50
Polystyrene	50	190	45	370	90	35

Vulcanized at 140 °C using 3%,sulphur, 0.7% Santocure

เออร์ดีล (Erdil , 1986) ศึกษากราฟต์โคโพลิเมอร์ยางธรรมชาติด้วยเมทิลเมทาคริเลต และ ไวนิลโมโนเมอร์ชนิดอื่นๆ โดยใช้โพลีเอไมด์แอติเวเตดไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเริ่มต้น แล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์ยางที่ทำปฏิกิริยา และค่า water contact angle เพื่อใช้ประโยชน์ในการทำคอนแทกเลนส์ ค่าเปอร์เซ็นต์ยางที่ทำปฏิกิริยาหาได้โดยวิธีการตกตะกอน คือใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ละลายในสารละลายผสมเบนซินกับปิโตรเลียมอีเทอร์ และทำให้ตกตะกอนด้วยเมทานอล อบตะกอน ให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักตะกอนที่ได้คือน้ำหนักยางที่ไม่ทำปฏิกิริยากับโพลิเมอร์อื่นๆ ใช้การคำนวณในการหาเปอร์เซ็นต์ยางที่ทำปฏิกิริยา และตรวจสอบการกราฟต์โดยเครื่อง IR สเปกโตรมิเตอร์ ผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 แสดงกราฟต์โคโพลิเมอร์ของไวนิลโมโนเมอร์ในยางโดยมีโพลีเอไมด์แอติเวเตดไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเริ่มต้น

ที่มา : Erbil , 1986

NR latex	Parts by weight				Reacted NR(%)	Colour and transparency	water contact angle (°)
	MMA	HEMA	NVP	MA			
100	10	-	-	-	7	light yellow, transparent	82±1
100	28	-	-	-	19	light yellow, transparent	77±1
100	15	5	-	-	11	Brown, transparent	79±1
100	-	30	-	-	0	Brown, transparent	74±1
100	-	5	-	-	0	Brown, transparent	76±1
100	-	-	25	-	0	Brown, transparent	78±1
100	20	-	-	5	13	light yellow, transparent	82±1

HEMA = 2 - hydroxyethyl methacrylate

NVP = n - vinyl pyrrolidone

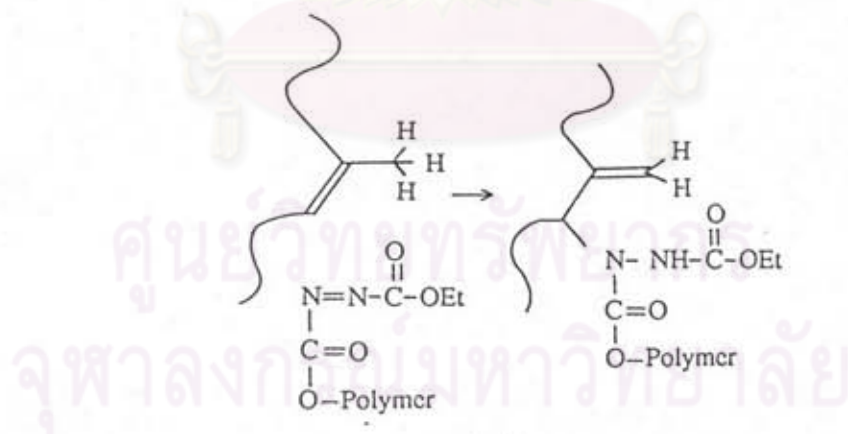
MA = methacrylic acid

แคมป์เบล และซอร์วี่ (Campbell and Seow, 1990) ศึกษาการกราฟต์โคโพลิเมอร์ยางธรรมชาติด้วยเมทิลเมทาคริเลต โดยใช้ฟังก์ชันนัลกรุปของอะโซไดคาร์บอกไซด์เลต (azodicarboxylate functional group) เป็นตัวเริ่มต้น และ เกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะเกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทางด้านวัลคาไนซ์เปลี่ยนไป ตามปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ที่เกิด และปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์วัดจากค่า %Grafting Efficiency (%GE) ด้วยวิธีใช้เครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC) วิเคราะห์ได้ผลการทดลองดังใน ตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกราฟต์ และปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

ที่มา : Campbell,D.S. and Seow,P.K .,1990

PMMA loading (% w/w)	GE (%)	
	IR	NR
25	78	-
30	76	36
35	72	38
40	71	42
45	67	-
50	65	48



รูปที่ 2.12 แสดงการกราฟต์โคโพลีเมอร์โดยใช้ฟังก์ชันนัลกรุ๊ปของอะซิโตนคาร์บอกไซด์เลต