

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต (supercritical fluids, SCF)

ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต หมายถึงสารใดๆในสถานะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว สถานะเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากเฟสไดอะแกรมความสัมพันธ์ความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์ใดๆ เช่นตามรูป 2.1 เป็นไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยมีเส้นการระเหิด (sublimation line) อยู่ระหว่างบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็งกับแก๊ส เส้นการหลอมเหลว (melting line) อยู่ระหว่างของแข็งกับของเหลว และเส้นการเดือด (boiling line) อยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว จุดที่อยู่ระหว่างทั้ง 3 สถานะเรียกว่าจุดรวมสามสถานะ (triple point)

แก๊สสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ 2 วิธี โดยการเพิ่มความดัน หรือลดอุณหภูมิเพื่อลดพลังงานจลน์ (kinetic energy)[1] ทำให้ระยะทางระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุด ๆ หนึ่ง โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มาก แม้จะให้ความดันเท่าใด ก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (critical temperature, T_c) และความดันที่จุดนี้จะเรียกความดันวิกฤต (critical pressure, P_c) จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต และความดันเท่ากับความดันวิกฤต เรียกว่าจุดวิกฤต (critical point)

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต และความดันมากกว่าความดันวิกฤต สารจะอยู่ในสถานะที่มีคุณสมบัติจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว เรียกสารที่อยู่ในสถานะนี้ว่าของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต โดยค่าอุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤตของสารต่างๆ แสดงไว้ในตาราง 2.1[2]

ตาราง 2.1 ข้อมูลภาวะวิกฤตของสารชนิดต่างๆ

สาร	T_c (K)	P_c (MPa)	Critical density (g/cm ³)
Methane	190.6	4.60	0.162
Ethylene	282.4	5.03	0.218
Chlorotrifluoromethane	302.0	3.92	0.579
Carbon dioxide	304.2	7.38	0.468
Ethane	305.4	4.88	0.203
Propylene	365.0	4.62	0.233
Propane	369.8	4.24	0.217
Methanol	512.6	8.09	0.272
Benzene	562.1	4.89	0.302
Toluene	591.7	4.11	0.292
Water	647.3	22.00	0.322
Ammonia	405.6	11.30	0.235

ของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต จะมีสมบัติทางฟิสิกส์อยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว ดังแสดงในตาราง 2.2[2] ความหนาแน่นของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตเกิดปฏิสัมพันธ์กัน ลดพลังงานเอนทัลปี (enthalpy) เกิดการละลายได้ดี[3,4] และขณะเดียวกันของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตก็มีความหนืด และการแพร่กระจาย (diffusivity) ใกล้เคียงแก๊สทำให้สามารถแทรกเข้าไปในสถานะตัวถูกละลายได้ดีด้วยสมบัติเหล่านี้ จึงนำของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือ มีอัตราการถ่ายเทมวลเร็วกว่า และมีพลังการทำละลาย (solvating power) ที่ดีกว่า เช่นมีการทดลองเปรียบเทียบการสกัดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหลวและคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะเหนือจุดวิกฤตพบว่า คาร์บอนไดออกไซด์สภาวะเหนือจุดวิกฤตให้อัตราการสกัดอย่างน้อย 2-5 เท่า[5] จึงมีบางครั้งที่เรียกของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตว่าตัวทำละลายยิ่งยวด แต่หากเทียบกับตัวทำละลายปกติแล้ว จะมีพลังการทำละลายที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตก็มีข้อที่ดีกว่าในหลายประการ[6]

ตาราง 2.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต เปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว

สถานะของไหล	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (ซม. ² /วินาที)	ความหนืด (กรัม/ซม.วินาที)
แก๊ส P=1atm, T=15-30°C	$(0.6-2) \times 10^{-3}$	0.1-0.4	$(1-3) \times 10^{-4}$
ของเหลว P=1atm, T=15-30°C	0.6-1.6	$(0.2-2) \times 10^{-5}$	$(0.2-3) \times 10^{-2}$
ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต			
P=P _c , T=T _c	0.2-0.5	0.7×10^{-3}	$(1-3) \times 10^{-4}$
P=4P _c , T=T _c	0.4-0.9	0.2×10^{-3}	$(3-9) \times 10^{-4}$

การศึกษาการละลายของสารในของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตครั้งแรกในปี 1879 โดย J.B.Hannay และ J.Hogarth แสดงการละลายของ methyl halide ในของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตของเอทานอลและคาร์บอนเตตระคลอไรด์[7] แต่ไม่ได้รับความสนใจมากนัก มีการศึกษาถึงประโยชน์ของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตอย่างจริงจังเมื่อไม่นานมานี้เอง ตัวอย่างการศึกษาทางของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตซึ่งลงตีพิมพ์ใน Journal Analytical Chemistry ก่อนปี 1986 มีเพียง 2 เรื่องเท่านั้น แต่ตั้งแต่ปี 1986 จนถึงกลางปี 1989 มีมากถึง 26 เรื่อง เหตุผลสำคัญที่ทำให้ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตได้รับความสนใจได้แก่ การค้นพบว่าตัวทำละลายที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ทำลายสิ่งแวดล้อม และแหล่งของตัวทำละลายมีจำกัดลงเป็นต้น[8]

1. สมบัติของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต

1.1 สมบัติการถ่ายโอน (transportation properties)

จากการที่ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตมีความหนืดต่ำ และสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง สามารถแทรกซึม (penetrate) เข้าชั้นตัวทำละลายได้ดี และทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตกระจายออกจากบริเวณสกัดไปบริเวณอื่นได้ง่าย อัตราการถ่ายเทมวลดี ส่งผลให้ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี

ความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต จะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการ[9,10] เช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต จึงต้องมีการปรับสภาวะให้เหมาะสม เพื่อให้สกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุด

อัตราเร็วการถ่ายเทมวล นอกจากเป็นผลโดยตรงจากความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตแล้ว ยังขึ้นกับระยะทางการแพร่และอุปสรรคการแพร่ ซึ่งเป็นปัจจัยจากชั้นตัวทำละลายด้วย จากรูป 2.2 แสดงผลของความหนาของชั้นตัวทำละลายต่อปริมาณ (yield) ของน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดถั่วเหลือง พบว่าเมื่อความหนาลดลง จะได้ปริมาณน้ำมันมากขึ้น การลดขนาดของชั้นตัวทำละลายจะลดระยะทางการแพร่ และมีการทำลายของผนังเซลล์ (cell wall) ซึ่งเป็นอุปสรรคการแพร่ได้[11]

1.2 พลังการทำละลาย (solvating power)

พลังการทำละลาย เป็นสมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตที่เหนือกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไป เนื่องจากสามารถปรับให้มีความเข้มข้นได้ง่ายโดยการปรับสภาวะ ตัวแปรประการแรกคือ อุณหภูมิ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว จะทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น แต่ในของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตการเพิ่มอุณหภูมิจะก่อให้เกิดผล 2 ประการที่ขัดแย้งกัน คือ

(1) เพิ่มการละลายของตัวถูกละลาย

(2) ลดความหนาแน่น ทำให้โมเลกุลของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตกับตัวถูกละลายอยู่ห่างกัน การละลายของตัวถูกละลายจึงลดลง

ผลรวมของผลที่ขัดแย้งกัน 2 ประการนี้คือ พลังการทำละลายของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งข้อขัดแย้งในประการที่ 2 สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ความดันกับของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต เพื่อคงสภาพความหนาแน่นให้ใกล้เคียงกับสภาวะเดิมก่อนที่จะมีการเพิ่มอุณหภูมิ กล่าวโดยสรุปคือ ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อพลังการทำละลาย คือ อุณหภูมิและความหนาแน่น ดังแสดงตามรูป 2.3 ความดันจะมีผลทางอ้อม โดยส่งผ่านความหนาแน่น[12,13]

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังการทำละลาย อุณหภูมิ และความหนาแน่นของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถแสดงในรูปของสมการระยะทางการแพร่ของการถ่ายโอนมวลของ Chrastil[14] ดังนี้

$$C = d^k \exp\left(\frac{a}{T+b}\right)$$

C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต (g/l)

d = ความหนาแน่นของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต (g/l)

k = association number ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารซับซ้อนระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลาย

T = อุณหภูมิ (K)

a, b = ค่าคงที่

ในปี 1981 D.F.Williams ได้อธิบายสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤต โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่นและความดัน นำเสนอในรูปของตัวแปรลดทอน ($T_r = T/T_c$, $P_r = P/P_c$) (รูป 2.4) ในช่วงที่เป็นเส้นโค้งคือบริเวณที่แสดงสมดุลระหว่างของเหลวและไอ (ช่วงที่แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลว) ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต คือบริเวณอุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤต มีค่ามากกว่า 1 ส่วนช่วงอุณหภูมิลดทอน 0.95-1.0 เรียกว่าของเหลวใกล้จุดวิกฤต (near-critical liquid) ที่บริเวณจุดวิกฤต การเปลี่ยนแปลงความดันเพียงเล็กน้อย จะทำให้มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปมาก แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ (T_r มีค่ามาก) กราฟจะมีลักษณะลาดชัน การเพิ่มความหนาแน่นจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาด้านเครื่องมือ และที่อุณหภูมิสูงๆ ความหนาแน่นจะมีค่าค่อนข้างต่ำจนสภาพไม่เหมาะสมที่จะใช้งาน ดังนั้น จึงนิยมใช้ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต ในสถานะบริเวณเหนือจุดวิกฤตเล็กน้อยเนื่องจากสามารถเปลี่ยนหลังการทำละลาย โดยการปรับความดันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อนำเส้นความหนาแน่นเท่ากันมาเขียนลงบนเฟสไดอะแกรมจะได้ตามรูป 2.5 ที่ความดันและอุณหภูมิสูงสุด (ตามกราฟ คือ 400 บาร์, 100 °C) คาร์บอนไดออกไซด์จะมีหลังการทำละลายสูงสุด ที่บริเวณจุดวิกฤตแม้จะมีหลังการทำละลายต่ำกว่า แต่เช่นเดียวกันข้อมูลจากรูป 2.4 คือความหนาแน่นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดันมาก ที่บริเวณนี้จึงได้รับความสนใจมากกว่า จึงเลือกที่จะทำงานกับของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตในบริเวณจุดวิกฤตซึ่งสามารถปรับหลังการทำละลายด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันเพียงเล็กน้อย

1.3 สมบัติด้านการเลือกเฉพาะสาร (selectivity)

การเลือกเฉพาะสาร เป็นสมบัติของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตที่สามารถปรับอุณหภูมิและความดัน เพื่อให้มีหลังการทำละลายที่เหมาะสมเฉพาะกับสารที่ต้องการสกัดเพื่อให้ได้ผลผลิตมากที่สุด โดยมีสารที่ไม่ต้องการปนมาน้อยที่สุด ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือการสกัดสารจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ รูป 2.6 แสดงแก๊สโครมาโตกราฟี โครมาโตแกรมของสารไม่มีขั้ว (non-polar) ที่พบในผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ หากต้องการให้คาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤตคล้ายการ

กลั่นด้วยไอน้ำคือ ต้องการสกัดเฉพาะสารที่ระเหยง่าย ก็ใช้พลังงานทำละลายต่ำคือ ปรับให้สภาวะอยู่ในบริเวณของจุดวิกฤตเช่นตามรูปคือ 870 psi/60 °C ซึ่งในภาวะเช่นนี้ยังสามารถนำมาใช้ขจัดกลิ่นจากผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติอีกด้วย หากต้องการสกัดสารทุกชนิด ให้ใช้อุณหภูมิและความดันสูงๆ ตามรูป คือ 4,350 psi/60 °C แต่มักจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีติดมาทำให้มีสีคล้ำ การลดพลังงานทำละลายลงเล็กน้อยก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีจางลง ตัวอย่างเช่น การสกัด hop หากใช้ความดัน 300 บาร์จะได้สารสีเขียว แต่ที่ 140 บาร์จะได้สีเหลือง

จากการที่ของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต มีการเลือกเฉพาะสารค่อนข้างดี จึงสามารถนำมาใช้ในการสกัดแบบการสกัดลำดับส่วน สภาวะที่ใช้จะเริ่มต้นจากบริเวณจุดวิกฤต แล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิและความดัน ด้วยเทคนิคนี้สามารถสกัดแยกสารออกเป็นสัดส่วนต่างๆ เช่น การสกัดพริกไทยแยกเป็นสัดส่วนที่ให้รสเผ็ด และสัดส่วนที่ให้กลิ่นหอม การสกัดแยกไขมันเป็น 3 สัดส่วน สัดส่วนแรกจะมีกลิ่นและมีกรดไขมันอิสระมาก สัดส่วนที่สองมีกลีเซอไรด์ (glycerides) มาก และสัดส่วนสุดท้ายมีสารพวกไข (waxes) และ สี ซึ่งในสัดส่วนที่ 2 ยังสามารถสกัดให้ละเอียดลงไปแยกเป็นสัดส่วนที่มี mono-, di- หรือ triglyceride

2. การเลือกชนิดของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต

การเลือกชนิดของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต เพื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลายขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ที่สำคัญคือ พลังงานทำละลายของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต แต่ละชนิด พลังงานทำละลายอาจแสดงในรูปตัวแปรการทำละลายของ Hildebrand (Hildebrand solubility parameter, δ_s) [4,15,16] ตาม van der Waals equation ดังนี้

$$\delta_{Hq} = \left(\frac{\Delta E_v}{V} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

δ_{Hq} = ตัวแปรการทำละลาย

ΔE_v = พลังงานที่ทำให้ของเหลวกลายเป็นแก๊ส

V = ปริมาณโมเลกุลที่จะกลายเป็นแก๊ส

$\left(\frac{\Delta E_v}{V} \right)$ จึงเทียบเท่าแรงระหว่างโมเลกุล สารที่มี δ_{Hq} สูง จุดเดือดจะสูง

ในสภาพของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต

$$\delta_s = 1.25 P_c^{1/2} \left(\frac{\rho}{\rho_{liq}} \right) \quad (2.3)$$

δ_s = ตัวแปรการทำละลายของ Hildebrand

P_c = ความดันวิกฤต (บรรยากาศ)

ρ = ความหนาแน่นของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต

ρ_{liq} = ความหนาแน่นของสารนั้นในสถานะของเหลว

หรือใช้ค่า ρ_{liq} จากสมการ(2.2) มาเข้าสมการจะได้

$$\delta_s = \delta_{liq} \left(\frac{\rho}{\rho_{liq}} \right) \quad (2.4)$$

ตามสมการ(2.3) หากคิดว่าของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต มีความหนาแน่นใกล้เคียงของเหลว ดังนั้น $\rho / \rho_{liq} = 1$ ค่าของค่า δ_s เปรียบเทียบกับพลังการทำละลายของตัวทำละลายปกติ จะได้ค่าตามรูป 2.7

จากสมการ (2.2)-(2.4) พลังการทำละลายซึ่งแสดงในรูปตัวแปรการทำละลาย จะขึ้นกับปัจจัย 2 ค่า

(1) ค่าของ ρ / ρ_{liq} เรียกว่า ผลลัตถ์ซึ่งแปรตามอุณหภูมิและความดันที่ใช้ การเพิ่มความหนาแน่นของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต จะทำให้ค่า δ_s จะเพิ่มขึ้นด้วย

(2) ค่า δ_s และค่า $1.25 P_c^{1/2}$ เรียกว่า ผลทางเคมีจะขึ้นอยู่กับความมีขั้วของสาร สารที่มีขั้วมาก เช่น แอมโมเนียจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง ทำให้มีค่า δ_{liq} สูง ค่า δ_s จึงสูงด้วย ในขณะที่สารไม่มีขั้ว เช่น He จะมี δ_s ต่ำ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารที่มีขั้ว ผลที่ตามมาคือ อุณหภูมิวิกฤตมักจะมีค่าสูงตามไปด้วย เช่นอุณหภูมิวิกฤตของแอมโมเนียเท่ากับ 132 องศาเซลเซียส การออกแบบเครื่องมือจึงไม่สะดวกเท่าสารที่ใช้อุณหภูมิต่ำๆ

จากการศึกษาของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตชนิดต่างๆ สารที่ได้รับความสนใจมากที่สุดคือ คาร์บอนไดออกไซด์ ($T_c = 31^\circ \text{C}$) เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ ไม่เป็นพิษ ไม่ไวไฟ ไม่ก่อให้เกิดสนิม ราคาถูก หาได้ง่าย ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม และการที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถจัด

ออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย เพียงทิ้งไว้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง ทำให้ใช้กับสารที่ไม่ทนความร้อน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะนำมาใช้ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้ตามตาราง 2.3[5]

ตาราง 2.3 ข้อกำหนดของคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับงานสกัดสาร

กลิ่น	ไม่มีกลิ่นเหม็นไหม้	
สี	ไม่มีสี	
ปริมาณ CO ₂	อย่างน้อย 99.9 vol.% (วัดในสภาพของเหลวหรือแก๊ส)	[a,b]
PH ₃ , H ₂ S และสารประกอบอินทรีย์ชนิดรีดิคัล	ตรวจไม่พบในแก๊ส 100 ลิตร(ที่ STP)	[a-c]
กรดแปลกปลอมเช่น SO ₂ , HCl	ตรวจไม่พบในแก๊ส 100 ลิตร(ที่ STP)	[a-c]
คาร์บอนมอนอกไซด์	น้อยกว่า 2 vol.-ppm	[c,d]
สารประกอบที่ออกซิไดซ์ได้	สูงสุด 1 vol.-ppm	[a]
สารตกค้างจากการระเหย	สูงสุด 1 vol.-ppm	[a]

[a] W. Fresenius. W. Schneider. Mineralwasserzeitung 19. No.4 (1966)

[b] European Pharmacopeia. Vol.2 pp. 175-177 (1971)

[c] Zusatzstoff-Verkehrs-vo. Anlage 2. Liste 8.

[d] Analyaenmethoden HAG AG. Bremen. Vorschrift No.081 2.01 (1976)

อย่างไรก็ตามของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตมีสมบัติความมีขั้วต่ำ จึงเหมาะสมกับสารที่ไม่ชอบน้ำเป็นตัวทำละลายเช่น น้ำตาล, แป้ง, เกลือแร่, กรดไขมัน, กรดอะมิโน, โกลโคไซด์, อัลคาลอยด์ ส่วนมาก กรณีของน้ำตาลและกรดอะมิโน แม้จะใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันมากถึง 2,000 บาร์ ก็มีการละลายเพียง 1 : 200,000

ส่วนกรณีของอัลคาลอยด์เช่น การสกัด cannabiniol, colchicine จากผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติจะใช้ในตรัสออกไซด์ดีกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไนตรัสออกไซด์ มี dipole moment และมีความหนาแน่นมากกว่า[17,18]

3. สารขยายผลการทำละลาย (modifiers)

สารขยายผลการทำละลายคือ ตัวทำละลายเสริม ได้แก่ ตัวทำละลายชนิดต่างๆ ซึ่งเข้ากันได้กับตัวทำละลายหลักอย่างสมบูรณ์ มีผลให้เพิ่มพลังการทำละลายของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต

อย่างไรก็ตาม การเติมสารขยายผลการทำละลายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสไดอะแกรม การทำนายลักษณะการทำละลายเป็นไปได้ยาก เนื่องจากความรู้ทางด้านนี้ยังมีจำกัด จึงต้องใช้การทดลองเป็นเครื่องพิสูจน์ผลตัวการทำละลาย

ตัวอย่างการใช้สารดังกล่าวคือ

(1) การเติมโพรเพนลงในคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤต เพื่อช่วยการสกัดไตรกลีเซอไรด์ และ กรดไขมัน

(2) การเติมอะซีโตนลงในคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤตเพื่อสกัดไตรกลีเซอไรด์ สามารถลดความดันที่ใช้จาก 13.5 MPa (1,960 psi) เหลือเพียง 8 MPa (1,160 psi) ลดค่าใช้จ่ายได้ถึงร้อยละ 30[19]

4. ประโยชน์ของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต

แม้ของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตจะเป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว แต่การนำมาใช้ประโยชน์เริ่มแพร่หลายเมื่อไม่นานมานี้เอง สามารถสรุปประโยชน์ของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต ได้ดังนี้

(1) ใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด ทั้งงานสกัดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากๆ และงานสกัดในปริมาณน้อยๆ จุดประสงค์เพื่อนำสารสกัดไปวิเคราะห์ต่อไป

(2) ใช้เป็นเฟสของไหลในงานวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟี

ได้มีการพบว่าผลิตภัณฑ์ของสารบางชนิดที่ได้จากการสกัดด้วยของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต จะอยู่ในรูปผลึกขนาดเล็กมาก (10-50 μm) เมื่อนำมาศึกษาโดย X-ray diffraction แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึก (crystal structure) ของผลิตภัณฑ์ ที่ได้จะมีลักษณะเหมือนสารนั้นในสภาพเริ่มต้น จึงเสนอว่าสามารถใช้วิธีนี้ดึงสารออกมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิสูง

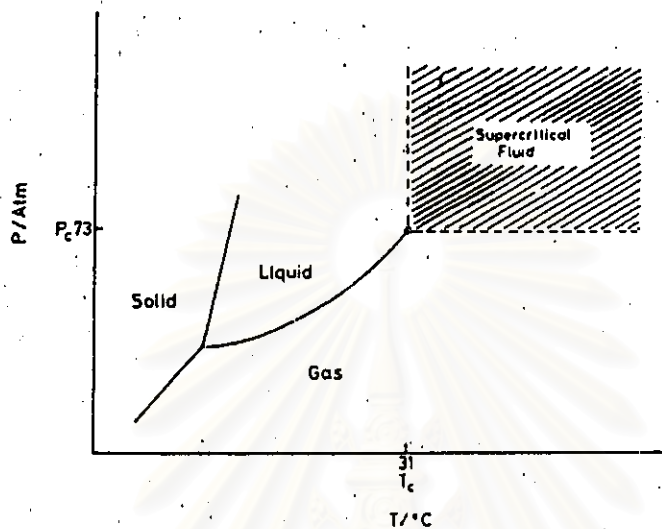
มีรายงานว่าวิธีสกัดสารด้วยของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤต สามารถนำเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงมีการเสนอว่าวิธีนี้สามารถใช้ในการฆ่าเชื้อ หรือใช้เป็นวิธีเบื้องต้นในการสกัดผลิตภัณฑ์จากเชื้อจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงไว้

5. ความเหมาะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวทำละลาย

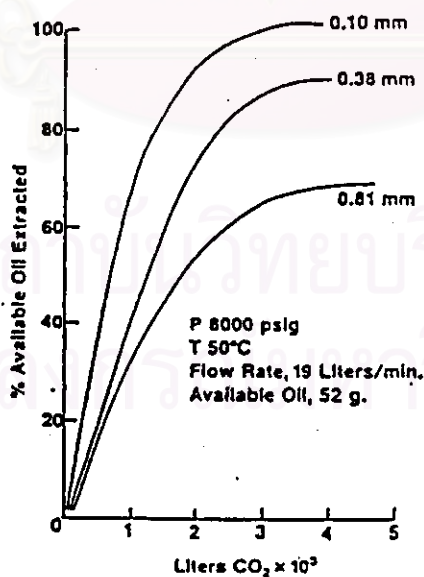
คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารอินทรีย์หลายชนิด ค่าการละลายซึ่งกันและกันกับน้ำมีค่าน้อย การระเหยสัมพัทธ์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ที่สกัดได้ ในด้านการขนถ่าย คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าความหนืดต่ำ สัมประสิทธิ์การกระจาย (diffusion coefficients) มีค่าสูงทำให้เคลื่อนที่ได้เร็ว ทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ คาร์บอนไดออกไซด์สามารถสร้างสภาพที่จุดวิกฤตได้ มีค่าความร้อนของการระเหย (enthalpy of vaporization) ต่ำ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟ ปลอดภัยราคาถูกและหาง่ายเมื่อเทียบกับสารอื่น



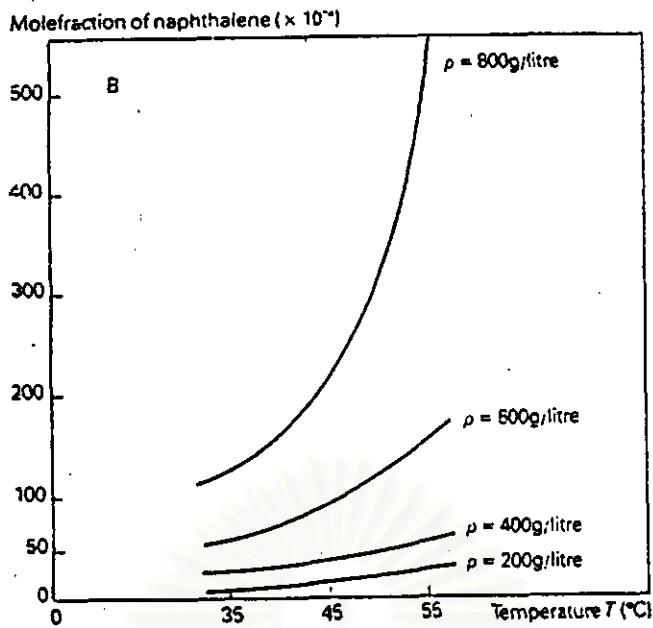
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



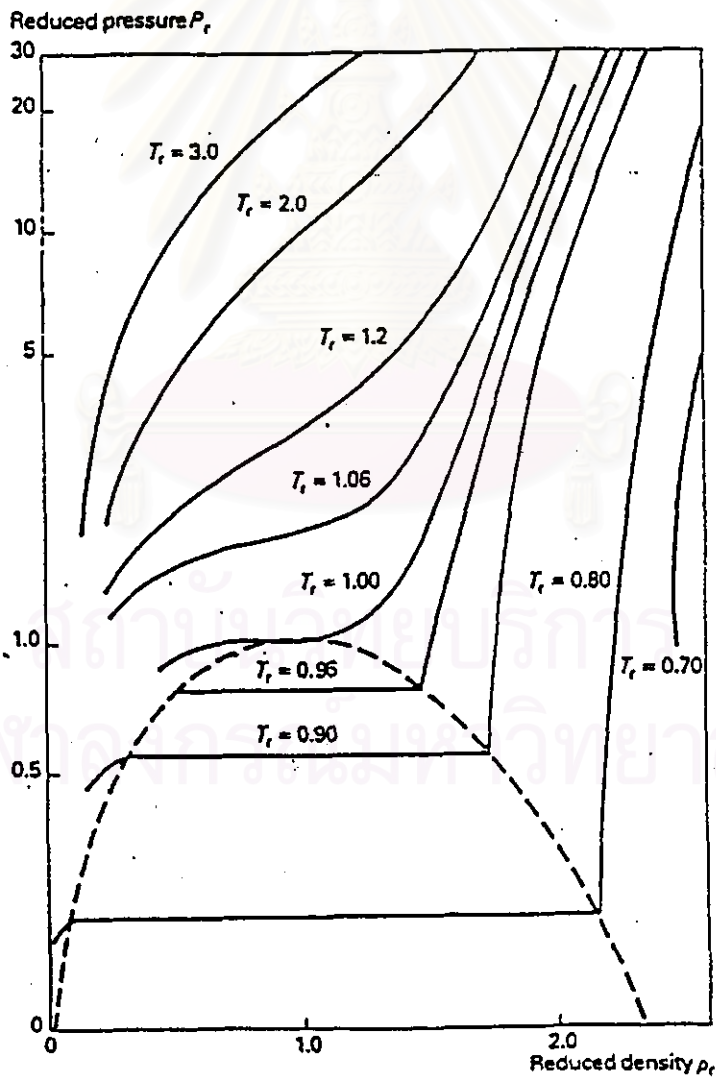
รูป 2.1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์



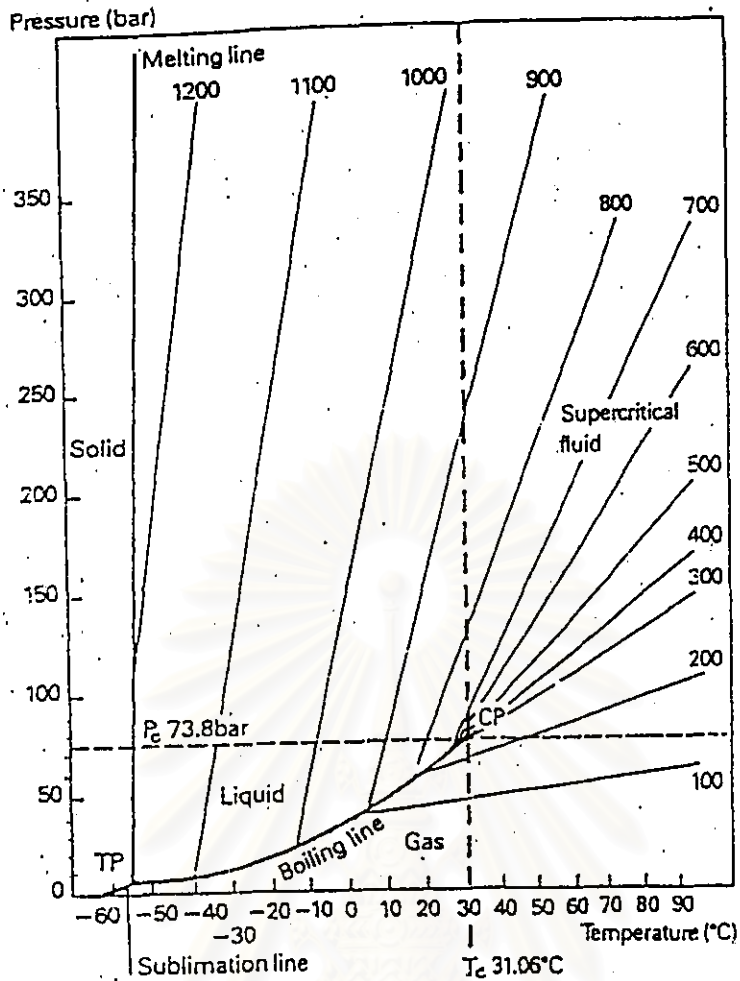
รูป 2.2 ประสิทธิภาพของการสกัดด้วยของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตในการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองเมื่อใช้ผงเมล็ดถั่วเหลืองที่มีขนาดต่างๆกัน



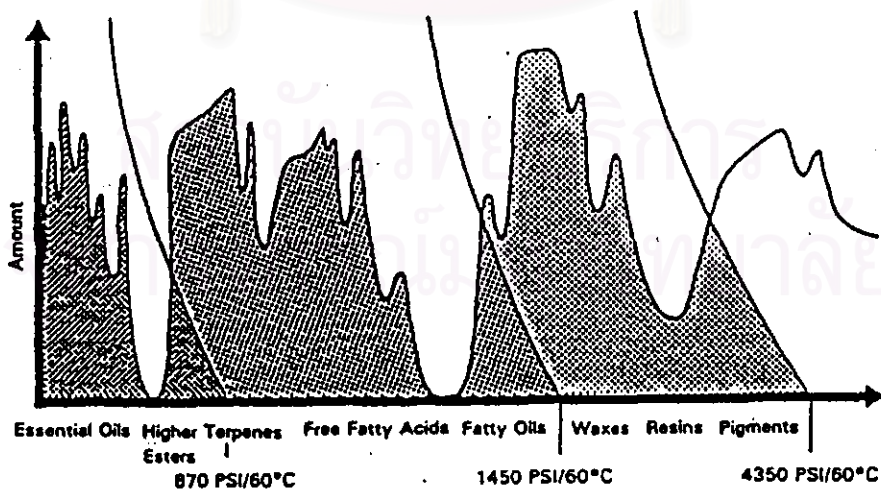
รูป 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของ naphthalene ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความหนาแน่นคงที่ต่างๆกัน



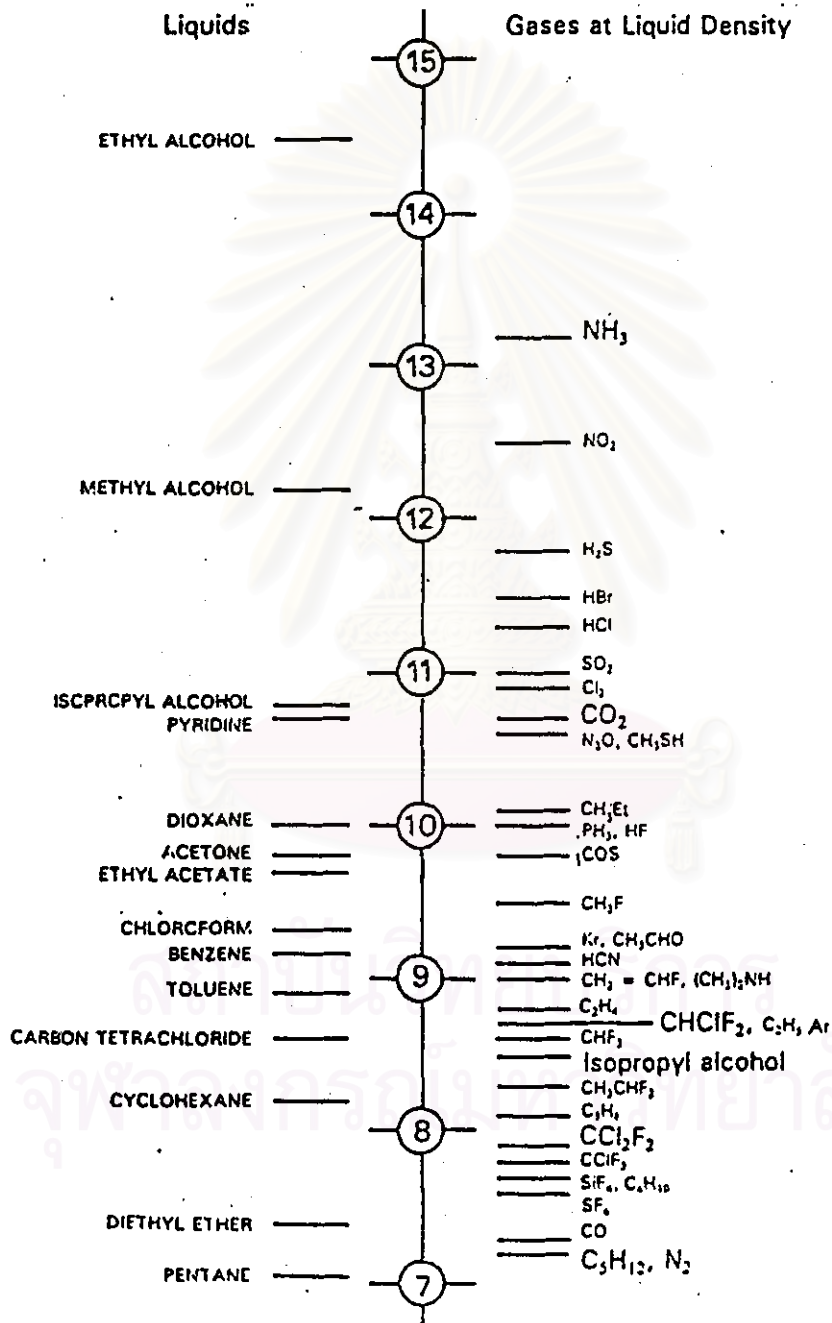
รูป 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความดันในรูปของตัวแปรลดทอน



รูป 2.5 ความหนาแน่นเท่ากันที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแสดงเป็นสามมิติของเฟสไดอะแกรม



รูป 2.6 แก๊สโครมาโตแกรมของสารจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่สภาวะต่างๆ



รูป 2.7 พลังการทำละลายของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตและตัวทำละลายปกติ ในรูปของ Hildebrand solubility parameter

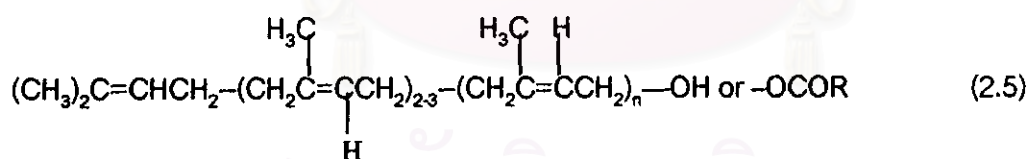
2.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ ในส่วนของเนื้อยางประกอบด้วยสารที่ไม่ใช่ยางประมาณร้อยละ 6 ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเกือบจะทั้งหมดมีโครงสร้างเป็นซิส (cis-configuration) และมีส่วนน้อยเป็นหมู่ฟังก์ชันอัลดีไฮด์ และอีพอกไซด์ มีสมมติฐานว่าหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีผลต่อการเกิดความแข็งของยางอันเนื่องมาจากการเก็บ (storage hardening) และการเกิดโครงสร้างกิ่ง (branching) และปริมาณเจล (gel)

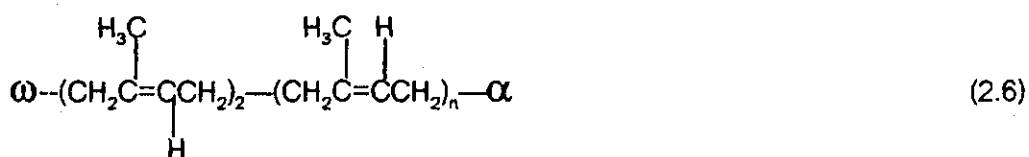
1. หมู่ฟังก์ชันที่ปลายของโมเลกุลยางธรรมชาติ

การศึกษาทางชีวเคมีในปี 1960 ได้ตั้งสมมติฐานการเกิดยางว่าเริ่มต้นจากการเติมไอโซเพนเทนนิลไดฟอสเฟต (isopentenyl diphosphate) ลงในไดเมทิลแอลิลไดฟอสเฟต (dimethyl allyl diphosphate) และเกิดสายโซ่ยาวๆต่อมาโดยเติม ไอโซเพนเทนนิลไดฟอสเฟต ลงในพอลิไอโซเพนนิลไดฟอสเฟต จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ทางชีววิทยาของเทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ใดๆก็ตามกลไกการเกิดสายโซ่ขั้นสุดท้ายนี้ยังไม่เป็นที่แน่ชัด

จากการวิเคราะห์โครงสร้างยางโดยใช้ ^{13}C - and ^1H -NMR spectroscopies พบว่าโครงสร้างของยางที่ได้จากใบของต้นสูงและเห็ด (mushrooms) ประกอบด้วยหมู่ไดเมทิลแอลิลหมู่ทรานไอโซพรีน 2-3 หมู่ และที่เหลือเป็นซิสไอโซพรีน ส่วนที่ปลายสุดของโมเลกุลเป็นไฮดรอกซิลหรือหมู่เอสเทอร์[22,23] ดังสมการ (2.5)



แต่สำหรับยางธรรมชาตินั้นพบว่าสัญญาณจาก ^{13}C -NMR ไม่ได้บ่งบอกแน่ชัดว่าหมู่ไดเมทิลแอลิลและไฮดรอกซิลหรือหมู่เอสเทอร์ เป็นหมู่โมเลกุลที่ปลายทั้งสองของยางธรรมชาติ แต่ที่ทราบแน่ชัดคือ โครงสร้างหลักของยางธรรมชาติประกอบด้วยหมู่ทรานไอโซพรีน 2 หมู่และที่เหลือเป็นซิสไอโซพรีน[24] ดังนั้นโครงสร้างธรรมชาติจึงเป็นดังสมการ (2.6)



(ω และ α หมู่ฟังก์ชันที่ปลายโมเลกุลที่มีสมมติฐานว่าเป็นโปรตีนและกรดไขมันตามลำดับ)

2. ผลของโปรตีนต่อการเกิดเจลและความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติ

มีสมมติฐานว่าโปรตีนในยางธรรมชาติมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลของยาง จากการศึกษาการลดโปรตีน (deproteinization) ด้วยเอนไซม์โปรทีโอไลติก (proteolytic) และใช้สารลดแรงดึงผิวช่วย สามารถลดปริมาณไนโตรเจนของยางธรรมชาติลงได้จากร้อยละ 0.3 เหลือเพียงร้อยละ 0.01[25] และการลดโปรตีนในน้ำยางชนิด HA (high ammonia) และในน้ำยางสด (field latex) สามารถลดปริมาณแฉกได้จากร้อยละ 42.5 เหลือร้อยละ 2.2 และจากร้อยละ 2.6 เหลือร้อยละ 1.5 ตามลำดับ แสดงว่าการลดโปรตีนมีผลต่อปริมาณแฉกในยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีความต้านทานแรงดึงสูง ซึ่งแตกต่างจากยางสังเคราะห์ cis-1,4-polyisoprene และยางวาวยูเล่ (Guayule rubber) จากการศึกษาพบว่าความต้านทานแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับการลดโปรตีนในน้ำยางชนิด HA และน้ำยางสด โดยค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางชนิด HA จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับเวลาในการเก็บน้ำยาง (storage period) [26] และค่าความต้านทานนี้ไม่ลดลงหลังจากมีการลดโปรตีน แสดงว่าปริมาณโปรตีนไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของน้ำยางชนิด HA

ตาราง 2.4 ผลของการลดโปรตีนต่อปริมาณแฉกและค่าความต้านทานแรงดึงของยาง

การลดโปรตีนของน้ำยางชนิด HA	ไนโตรเจน (%)	แฉก (%)	Mw X10 ⁶	Mw/Mn	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	การยืดออกเมื่อขาด (%)
ตัวแปรควบคุม	0.56	42.5	3.45	37.1	7.9	1160
สารลดแรงดึงผิว ^a หมุนเหวี่ยง 1 ครั้ง	0.08	27.3	2.69	20.8	7.6	1140
สารลดแรงดึงผิว ^a หมุนเหวี่ยง 3 ครั้ง	-	-	2.69	20.8	7.8	1210
สารลดแรงดึงผิว ^a หมุนเหวี่ยง 5 ครั้ง	0.03	8.8	2.69	20.8	7.0	1150
เอนไซม์/สารลดแรงดึงผิว ^b หมุนเหวี่ยง 3 ครั้ง	0.008	2.2	2.46	8.8	7.2	1180

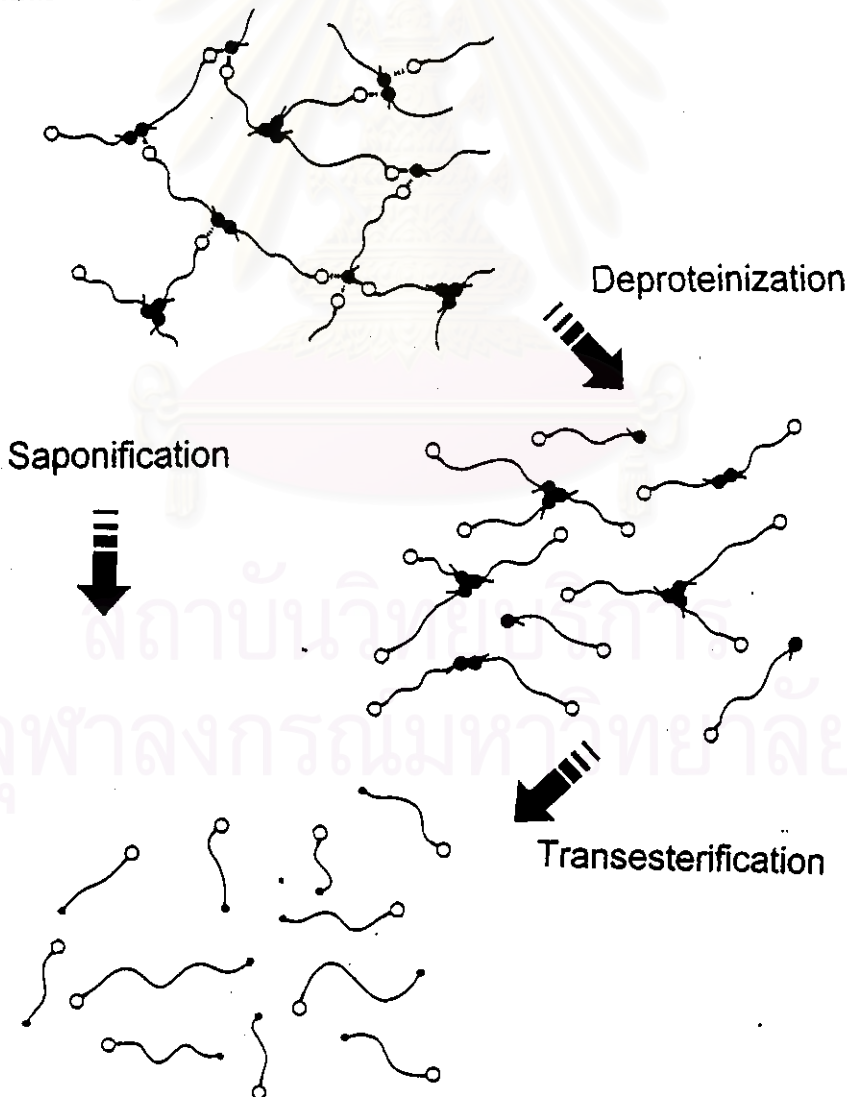
^aHA-latex (10%) ทำให้เสถียรด้วย Triton X-100 และล้างด้วยการหมุนเหวี่ยง

^bHA-latex (10%) ทำให้เสถียรด้วย sodium naphthenate และลดโปรตีนด้วยเอนไซม์อัลคาเลส (alcalase) 2.0T และตามด้วยการหมุนเหวี่ยง

3. ผลของหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ต่อโครงสร้างกึ่งและการเกิดเจลของยางธรรมชาติ

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่ายางธรรมชาติประกอบด้วยกรดไขมันทั้งชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ประมาณร้อยละ 1[27] ซึ่งกรดไขมันนี้จะช่วยทำให้อนุภาคยางในน้ำยางมีเสถียรภาพมากและเมื่อทำเป็นยางแห้งแล้วจะมีสมบัติการขึ้นรูป (processability) ดีขึ้น

จากการศึกษาพบว่าการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) กับยางธรรมชาติจะมีผลให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง แสดงว่าการเกิดทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะไปทำลายหมู่เอสเทอร์ที่เชื่อมปลายโมเลกุล และโครงสร้างกึ่งของยางธรรมชาติจะลดลง [28] และพบว่ากรดปอร์ตินทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลงเพราะการลดปอร์ตินทำให้ปริมาณเจลลดลง ช่วยให้สายโซ่แต่ละสายหลุดออกจากกันเปลี่ยนจากโมเลกุลใหญ่ กลายเป็นสายโมเลกุลเล็กๆแต่ละสายไม่ติดกันแสดงดังรูป 2.8 จากการลดปอร์ตินและการเกิดทรานเอสเทอร์ฟิเคชันกับยางธรรมชาติจะทำให้โครงสร้างยางเปลี่ยนไปคือ จากโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านสาขาเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเส้นตรงมากขึ้น



รูป 2.8 การลดปอร์ตินและการเกิดทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในยางธรรมชาติ

2.3 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ได้มีการศึกษาวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางโดยใช้เครื่อง GPC (Gel permeation chromatography) และพบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางแต่ละพันธุ์เป็นได้ทั้ง unimodal และ bimodal

ยางธรรมชาติพันธุ์ที่มีความหนืดสูง จะมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเป็นแบบ unimodal ส่วนยางพันธุ์ที่มีความหนืดต่ำ จะมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเป็นแบบ bimodal ค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (polydispersity) ของยางพันธุ์ต่างๆ คืออัตราส่วน $D = Mw/Mn$ แสดงให้เห็นถึงความกว้างของการกระจายโมเลกุล สำหรับสารโมเลกุลใหญ่ที่มีขนาดโมเลกุลเท่าๆ กันจะมีค่า D ประมาณ 1 ในขณะที่สารโมเลกุลใหญ่ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลสูง ก็จะมีค่า D สูงมากกว่า 1

การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ bimodal มี 2 ลักษณะคือ

1. การกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีจุดสูงสุด 2 จุดและจุดสูงสุดนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน

2. การกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีจุดสูงสุด 2 จุดและจุดสูงสุดนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน

การแยกองค์ประกอบต่างๆ ในของผสมพอลิเมอร์ (polymeric mixture) ใช้หลักการแยกขนาดโมเลกุล สมมติว่ามีของผสมประกอบด้วย 3 องค์ประกอบคือ A, B และ C โดย A เป็นองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดและ C เป็นองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด เมื่อฉีดเข้าไปในคอลัมน์ องค์ประกอบ A จะไม่แพร่กระจายเข้าไปในรูพรุนของคอลัมน์เพราะมีขนาดโมเลกุลใหญ่ โดยจะเคลื่อนที่หลุดออกจากคอลัมน์มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของช่องว่างในคอลัมน์ ส่วนองค์ประกอบ C จะแพร่กระจายเข้าไปในอนุภาคอย่างสมบูรณ์เพราะมีขนาดโมเลกุลเล็กพอที่จะแพร่ผ่านรูพรุนของอนุภาคในคอลัมน์ได้

ดังนั้นลำดับการหลุดออกจากคอลัมน์ขององค์ประกอบต่างๆ เป็นดังนี้คือ A, B และ C คอลัมน์ที่ใช้แยกขนาดโมเลกุล บรรจุด้วยอนุภาคที่มีสมบัติสามารถแยกขนาดได้ มีความพรุนสูง มีสมมติฐานว่าปริมาตรรูพรุนของอนุภาคที่บรรจุในคอลัมน์ มีค่ามากกว่าปริมาตรอนุภาคมากและปริมาตรช่องว่างในคอลัมน์มีค่าน้อย ดังนั้น

$$V_t = V_o + V_p \quad (2.7)$$

V_t = ปริมาตรทั้งหมดของคอลัมน์

V_p = ปริมาตรรูพรุนของอนุภาคที่บรรจุในคอลัมน์

V_o = ปริมาตรช่องว่างในคอลัมน์

โมเลกุลเล็กจะแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุนของคอลัมน์ซึ่งจะมีปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรของคอลัมน์ โมเลกุลที่แพร่กระจายเข้าไปในรูพรุนเพียงบางส่วน จะหลุดออกจากคอลัมน์โดยมีปริมาตรอยู่ระหว่าง V_0 และ V_t โดยปริมาตรที่คำนวณได้คือ elution volume, V_e

$$V_e = V_0 + K \cdot V_p \quad (2.8)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่

น้ำหนักโมเลกุลถูกนิยามไว้หลายแบบคือ M_w , M_n , M_z

ตาราง 2.5 แสดงการคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก	M_w
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน	M_n
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย Z	M_z

$$M_n = \frac{\sum M_i \cdot N_i}{\sum N_i}$$

$$M_w = \frac{\sum N_i \cdot (M_i)^2}{\sum N_i \cdot M_i}$$

$$M_z = \frac{\sum N_i \cdot (M_i)^3}{\sum N_i \cdot (M_i)^2}$$

เมื่อ N_i คือจำนวนโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ M_i

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 สมบัติของยางและการใช้งาน

ในปี 1983 Flory, Paul J.,[29] ได้ให้ความหมายที่แสดงคุณลักษณะที่สำคัญที่สุด 2 ประการ อันเป็นเอกลักษณ์ของยางเอาไว้ว่า ยางเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนรูปได้มาก โดยไม่ถูกทำลายหรือฉีกขาด จึงมีสมบัติด้านความเหนียวเหมือนว่ามันเป็นของเหลว ในขณะเดียวกันก็มีความสามารถในการคืนตัวสู่ขนาดเดิมได้ในทันทีเมื่อแรงเค้นหยุดกระทำ ทำให้ยางมีสมบัติของของแข็ง คือ มีความยืดหยุ่น เมื่อรวมสมบัติทั้ง 2 ด้านนี้เข้าด้วยกันเราจึงมักเรียกว่า ยางเป็นวัสดุวิสโคอีลาสติก (viscoelastic material) นั่นเอง นอกจากนี้ยางยังมีสมบัติเด่นอื่นๆ อีกหลายประการพอสรุปได้ดังนี้คือ

1. ความสามารถปรับสมบัติของยางโดยการผสมสารเคมี

กระบวนการแปรรูปยาง (rubber processing) เป็นวิธีนำยางดิบมาผสมสารตัวเติมต่างๆ เรียกว่าสูตรยาง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ ยางที่ได้นี้เรียกว่า ยางผสมสารเคมี (rubber compound) แล้วจึงนำยางนี้ไปขึ้นรูป และทำให้คงรูปโดยกระบวนการวัลคาไนซ์ เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่สามารถนำไปใช้งานได้ โดยวิธีการย่อยๆ ดังกล่าวนี้เราสามารถออกแบบให้ได้ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ยกตัวอย่างเช่น ยางบริสุทธิ์ที่ไม่มีสารตัวเติมผสมอยู่เลย นำมาผสมกับกำมะถันประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักยางแล้วนำไปวัลคาไนซ์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100-400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่งจะได้ยางยืดที่มีความยืดหยุ่นสูง อ่อนนุ่มสามารถยืดตัวได้ 5-9 เท่าของความยาวเดิม และหดตัวกลับสู่ขนาดเดิมได้ทันที เป็นยางที่มีความต้านทานแรงดึง (tensile strength) สูงถึง 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แต่เมื่อเติมกำมะถันในปริมาณที่สูงขึ้นๆ เช่น ใส่กำมะถันถึงร้อยละ 25 เมื่อวัลคาไนซ์แล้วจะได้ยางแข็ง (ebonite) ที่แข็งเหนียว มีความต้านทานแรงดึงสูงเหมือนของแข็งทั่วไปคือ ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 10,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นต้น

นอกจากการเติมผงกำมะถัน ซึ่งมีความจำเป็นในการทำให้ยางคงรูปดังกล่าวแล้ว ถ้าผสมเขม่าดำ (carbon black) เพิ่มเข้าไปอีกชนิดหนึ่งเมื่อนำไปวัลคาไนซ์แล้ว สมบัติด้านความแข็งแรงของยางก็จะเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างในตาราง 2.6[30]

ตาราง 2.6 ผลของเคมีค่าต่อสมบัติเชิงกลของยาง

ลักษณะยาง	ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	การยืดตัวสูงสุด (ultimate elongation) เปอร์เซ็นต์
ยางดิบ	200	-
ยางวัลคาไนซ์ไม่มีเคมีค่า	2500-3500	750-850
ยางวัลคาไนซ์เติมเคมีค่า	3500-4000	550-650

จะเห็นว่าถึงแม้ยางดิบจะมีความแข็งแรงต่ำ (นอกเหนือจากการไม่ยืดตัว เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมากๆ) แต่เมื่อนำมาปรับปรุงสมบัติโดยการวัลคาไนซ์ (ใส่กำมะถันแล้วให้ความร้อน) และการเติมเคมีค่าสมบัติเชิงกลของยางจะเปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้นมาก ขนาดของการเปลี่ยนนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ จากตาราง 2.6 จะพบว่ายางวัลคาไนซ์ที่ไม่เติมเคมีค่าจะมีการยืดตัวดีมากถึงร้อยละ 850 เมื่อผสมเคมีค่าเข้าไปยางจะยืดตัวน้อยลง (เหลือร้อยละ 650) แต่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (นอกเหนือจากการเพิ่มปริมาตรและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์) กรณีนี้จะเราจัดว่าเคมีค่าเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing agent) ดังจะเห็นได้จากการทำยางรถยนต์ ดังนั้นอุตสาหกรรมยางจึงเป็นกระบวนการที่นำยางดิบที่อยู่ในรูปของยางแผ่น ยางแท่ง หรือน้ำยางข้น มาผสมสารเคมีต่างๆ ที่เมื่อขึ้นรูปและทำให้เกิดการวัลคาไนซ์แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ใช้งานที่มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมนั่นเอง

2. สมบัติด้านการยืดหยุ่นของยาง

การยืดหยุ่นจัดเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญที่สุดและเป็นที่ยึดกันดีของยาง ยางดิบมีสมบัติเป็นวัสดุประเภทวิสโคอีลาสติกที่อ่อนตัวไม่คงรูปในการใช้งาน เพราะเกิดการไหลของโมเลกุลขึ้นได้เมื่อถูกแรงกระทำอย่างต่อเนื่องกับเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สมบัติที่ด้อยข้อนี้ของยางดิบกลับกลายเป็นข้อดี ในกระบวนการแปรรูปยาง เพราะช่วยให้สามารถนำสารอื่นๆ ที่เรียกว่า สารเคมีหรือสารตัวเติมมาผสมเข้าไปในเนื้อยางได้โดยง่าย วิธีนี้เรียกว่า การบดหรือการนวด (mastication) ยางซึ่งเป็นกระบวนการทำให้โมเลกุลของยางมีขนาดเล็กลง โดยความร้อนและงานกลจะได้ยางที่อยู่ในสถานะพลาสติกที่อ่อนนุ่ม และไหลได้สามารถหลอมรีด หรืออัดให้เป็นรูปร่างต่างๆ ก็ได้ตามต้องการ แล้วจึงนำไปวัลคาไนซ์ ยางจะคงรูปเป็นวัตถุยืดหยุ่นที่คงรูปเกือบสมบูรณ์ มีลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง คือ สามารถยืดตัว หดตัว บิดเบี้ยว หรือโค้งงอได้อย่างมากมาย และอย่างรวดเร็วเมื่อถูกแรงกระทำ เช่นอาจยืดตัวได้สูงถึงร้อยละ 500-1,000 เมื่อเปรียบเทียบกับการยืดตัวของเหล็กกล้าที่มีเพียงร้อยละ 0.5 เท่านั้น ตัวอย่างเช่น ลวดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ต้องออกแรงถึง 1,600 นิวตัน (ประมาณ 163 กิโลกรัม) เพื่อตั้งให้ยืดตัวร้อยละ 1 แต่ยางขนาดเท่ากันต้องการแรงตั้งเพียง 0.01 นิวตันเท่านั้น สมบัตินี้ทำให้ของใช้หรือชิ้นส่วนที่ทำจากยางไม่ถูกทำลายเมื่อนำมาใช้ในงานที่มีแรงกระทำ
2. มีความแข็งแรงมาก กล่าวคือยางเป็นวัสดุที่มีความต้านทานแรงดึงสูง และมีโมดูลัสสูง และมีความแข็งตัวสูงเมื่อยืดหรือหดตัวเต็มที่
3. สามารถคืนตัวได้อย่างรวดเร็วมากซึ่งแสดงสมบัติด้านการรีดตัว และการกระด้างตัวคืนกลับของยางทำให้ยางเป็นวัสดุที่เป็นสปริงอยู่ในตัว
4. สามารถกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้เกือบสมบูรณ์ เมื่อแรงภายนอกหยุดกระทำ ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีการเสียรูปต่ำ (low permanent set) ทำให้มีความเหมาะสมในการใช้งานที่มีภาระกระทำอย่างสม่ำเสมอแบบมีคาบ

3. สมบัติด้านการรับพลังงานของยาง

นอกจากคุณประโยชน์ด้านความยืดหยุ่นดังกล่าวมาแล้ว ยางยังแสดงความแข็งแรงทนทานเป็นอย่างมากเมื่อนำไปใช้งานเพื่อรับภาระจากการกระทำของแรงภายนอก กล่าวคือ ยางเป็นวัสดุที่สามารถรับพลังงานเอาไว้ในตัวได้สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักรยาง เราจะเห็นสมบัติด้านนี้ได้จากการพิจารณาค่าพลังงานจำเพาะ (specific energy) หรือความหนาแน่นของพลังงาน ซึ่งเป็นค่าพลังงานจากการยืดหรือหดตัวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของยาง และพบว่ายางเป็นวัสดุที่มีค่าพลังงานจำเพาะสูงมากและสูงกว่าวัสดุอื่นๆ ทั้งหมด ค่านี้เป็นค่าที่แสดงพลังงานสปริงของยาง (elastic spring energy) แสดงว่ายางเป็นวัสดุที่เป็นสปริงอยู่แล้วโดยธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุใช้งานทางวิศวกรรมอื่นๆ จะเห็นลักษณะพิเศษของยางได้ ดังตาราง 2.7[31]

ตาราง 2.7 พลังงานจำเพาะที่เก็บสะสมในตัวของวัตถุ

ชนิดของวัตถุ	พลังงานจำเพาะ (ฟุต-ปอนด์ / ปอนด์)
เหล็กหล่อ	0.37
เหล็กกล้า	3.07
อะลูมิเนียมรีด	7.56
เหล็กสปริง	95.30
ยางวัลคาไนซ์	14,600.00

จากตาราง 2.7 แสดงให้เห็นว่า พลังงานที่ยางดูดกลืนไว้ในรูปของพลังงานสปริงมีค่าสูงกว่าโลหะหรือสปริงโลหะมากเมื่อเปรียบเทียบต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก หมายความว่าในงานปฏิบัติ นั้น การใช้สปริงยางจะช่วยลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลงได้มาก และยังแสดงให้เห็นด้วยว่ายางรับแรงกระทำได้สูงสุด ถ้ามันมีน้ำหนักเท่าวัสดุอื่น โดยที่ตัวมันไม่ถูกทำลาย ตัวอย่างที่เห็นการใช้สมบัติด้านนี้ ได้แก่ การใช้ยางทำยางรองแท่นเครื่อง (mounting) ของเครื่องจักร เครื่องยนต์ ยางกันกระแทกของเรือหรือท่าเทียบเรือ (dock fender) ยางข้อต่อคัปลิง (coupling) ยางกันชน ยางรองหมอนคอนกรีต ยางหมอนคอสสะพาน (bridge bearing) เป็นต้น

4. สมบัติด้านความเสียหายและการต้านทานต่อการสึกหรอ

ยางเป็นวัสดุที่ต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานที่มีความเสียหายเช่น ถ้าใช้หนังเป็นพื้นรองเท้าจะมีอายุใช้งานเพียงประมาณ 3 เดือน ถ้าไม่ตอกเกือกม้ากันสึก แต่ถ้าใช้พื้นยางจะต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่าพื้นหนังมาก ทำให้อายุการใช้งานนานขึ้น ในขณะที่เดียวกันที่มีการยืดหยุ่น และการโค้งงอที่ดีช่วยให้พื้นรองเท้านุ่มไม่แข็งโดยทั่วไป เมื่อเพิ่มปริมาณเคมีดำเข้าไปมากขึ้นความต้านทานต่อการสึกหรอจะดีขึ้น เช่น ลูตริยางรถยนต์ ในทางตรงกันข้ามก็สามารถปรับสมบัติให้ยางมีเนื้อยู่สึกหรอง่ายขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการเติมสารประเภทฟาคติส (factice) ลงไปแทนเคมีดำ เช่น การทำยางลบ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้งานด้านการต้านทานการสึกหรอได้ดีก็มี เช่นยางรถยนต์ และยานยนต์อื่นๆ ยางสายพานรูปตัววี สายพานแบน หรือสายพานมีพื้นและสายพานลำเลียงสิ่งของ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะว่ายางเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงกับผิวโลหะทำให้สามารถจับผิวโลหะได้ดี เมื่อบวกกับความยืดหยุ่นจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมมากในการทำสายพานต่างๆ ทำให้รัดล้อยและเพลลาได้ดี

5. สมบัติด้านการต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี

ในอุตสาหกรรมเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารต่างๆ ที่มีสถานะเป็นกรด เป็นด่าง จึงในบางกรณีก็ไม่สามารถใช้โลหะ หรือไม่เป็นภาชนะบรรจุสารเหล่านั้นได้ แต่เราสามารถผลิตสูตรยางที่ทนกรดได้ ภาชนะบรรจุสารเคมีในกระบวนการผลิตจึงต้องมีการเคลือบหรือบุ (lining) ถึงโลหะด้วยยางทนสารเคมีเสียก่อน เช่น การเคลือบถัง (tank lining) หรือเคลือบท่อ (tube lining) เพื่อใช้เป็นท่อส่งสารเคมี อย่างไรก็ตามการเคลือบผิวทนกรดอาจเป็นวัสดุประเภทอื่น ที่มีไซยางก็ได้ แต่การใช้อย่างจะมีความเหมาะสมกับงานที่ภาชนะ หรือท่อมีการขยายตัวหดตัวหรือมีการโค้งงอ เพราะยางมีความยืดหยุ่นดีดังกล่าวแล้ว

6. สมบัติด้านอื่นในการใช้งาน

สมบัติที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ สมบัติด้านการเป็นตัวประสาน (การใช้เป็นกาว) สมบัติด้านการเป็นฉนวนไฟฟ้า และสมบัติด้านการเก็บรักษาอากาศหรือของเหลวได้

ในด้านการเป็นตัวประสานนั้น ได้แก่ การนำยางมาทำเป็นกาวยาง เช่น กาวยางของจดหมาย กาวติดกล่องกระดาษ กาวรองเท้า กาวปะยางหรือการใช้ทำผ้าไม่ทอ คือ ผ้าอัดยาง ใช้อัดทำยางพื้น พรหมปูพื้น และการใช้ผสมกับเม็ดสีทำสี เป็นต้น

ในด้านการเป็นฉนวนไฟฟ้านั้น เป็นการใช้งานตามสมบัติทางไฟฟ้าของยางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า มีความทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) สามารถใช้หุ้มสารเคเบิลไฟฟ้าได้ดี โดยเฉพาะสายที่มีความต้องการการโค้งงอมาก

ในด้านการเก็บรักษาของเหลวและแก๊สเป็นการใช้สมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของโมเลกุลของของเหลวและแก๊สได้ดี เช่น ใช้ทำได้ปากกาน้ำดื่ม ใช้อาบผ้าใบบอลูน อาบใบเรือ แผ่นยางบุ อ่างเก็บน้ำ ยางในรถต่างๆ ยางท่อลม ยางท่อน้ำ ท่อดับเพลิง และใช้ทำลูกโป่ง เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 ยางผง (powdered rubber)

วิธีการเตรียมยางผง

1. การฉีดแห้ง (spray drying)

ทำน้ำยางข้นโดยวิธีทำเป็นครีม (creaming) โดยนำน้ำยางสดมาเติมแอมโมเนียร้อยละ 0.45 โดยน้ำหนัก และเติมสบู่ (laurate soap) เพื่อให้สมบัติเชิงกลคงที่และ hydrolyamine neutral sulphate เพื่อให้ความหนืดคงที่ จากนั้นนำน้ำยางไปทำเป็นครีมโดยใช้ sodium alginate ช่วยให้เกิดเป็นครีมประมาณ 14-36 ชั่วโมง ได้น้ำยางมีความหนืดขาน (zahn cup viscosity) อย่างน้อย 23 วินาที น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางประกอบด้วยปริมาณของแข็งร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความหนืด 16 วินาที ไม่สามารถสเปรย์ออกมาภายใน 90 นาทีได้ เพราะว่ายางจะจับตัวกันขณะฉีด แต่ถ้าความหนืดเพิ่มขึ้นถึง 23 วินาทีจะต้องฉีดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในทางปฏิบัติ ความหนืดที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 23-30 วินาทีโดยการใช้น้ำยาง แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสมทางเศรษฐกิจ

การทำน้ำยางข้นโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง จะได้น้ำยางมีความหนืดอย่างน้อย 23 วินาทีและมีปริมาณของแข็งอย่างน้อยร้อยละ 60 เช่นกัน แต่วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง และมีการสูญเสียเนื้อยางประมาณร้อยละ 5 ในขณะที่การใช้วิธีให้น้ำยางลอยผิวจะสูญเสียเนื้อยางเพียงร้อยละ 2-2.5

นำน้ำยางข้นที่มีความหนืด 25 วินาทีและมีปริมาณของแข็งร้อยละ 55 (%drc) มาฉีดโดยใช้ไอน้ำร้อนประมาณ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งกำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนและมวลอย่างรวดเร็ว ควบคุมการฉีดโดยการเหนี่ยวนำยางข้นออกมาจากถ้วยคว่ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 นิ้ว หมุนด้วยความเร็ว 6,400 รอบต่อนาที

ยางแห้งจะจับอยู่บนผนังด้วยในภาชนะและมีใบพัดกวาดยางเหล่านั้นลงด้านล่าง และส่งไปเก็บในภาชนะบรรจุโดยการเป่าอากาศพาไป

เนื่องจากมีอนุภาคยางจำนวนมากติดอยู่ที่ผนังภาชนะ จึงทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงต้องนำไปบดให้ยางแตกเป็นอนุภาคเล็กลงและนำไปคัดขนาดต่อไป อนุภาคยางที่ได้โดยวิธีนี้มีความพรุน เมื่อผ่านการบดด้วย hammer mill และคัดขนาดแล้วจะได้ยางผงที่มีขนาดเล็กและเท่ากันได้ เมื่อได้ยางผงแล้วนำมาปล่อยให้เย็นโดยจะต้องมั่นใจว่ายางผงนั้นไม่จับตัวกันและแต่ละอนุภาคมีขนาดเท่ากัน ในกระบวนการผลิตจะติดตั้งถังพักยางผง เพื่อลดอุณหภูมิลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบรรจุถุงเพื่อจำหน่ายต่อไป

ตาราง 2.8 สมบัติทางกายภาพของยาง compound ที่ได้จากยางผง[32]

Hardness, IRHD	20
Tensile strength, MPa	9.0
Elongation at break, %	640
Modulus 100, MPa	0.10
Modulus 300, MPa	0.57
Modulus 500, MPa	2.39

สูตรยาง : Crusoe NS, 100; Calcium Carbonate(ppt), 60; Carbon Black(FEF), 20; Naphthenic oil, 100; Zinc Oxide, 5; Stearic Acid, 2; Permanex WSL, 2; Antilux 654, 3; sulphur, 2.5; MBTS, 1.0; DPG, 0.5; Optimum cure time at 150 °C, 14 min.

2. การทำเม็ดยางที่ไหลได้อิสระ

การผลิตยางผงโดยวิธีนี้มี 3 ขั้นตอนคือ

(1) การจับตัวของน้ำยางและการลดขนาดเม็ดยาง (coagulation and size reduction of coagulation)

(2) การปรับผิวด้วยสารเคมี (surface chemical treatment of discrete crumbs)

(3) การทำแห้งเม็ดยาง (drying of surface-treated crumbs)

เติมน้ำมันละหุ่งที่มีปริมาณของแข็งปนอยู่ร้อยละ 0.7 และ sodium metabisulphate ที่มีปริมาณของแข็งปนอยู่ร้อยละ 0.08 ลงในน้ำยางสด และทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนโดยเติมกรดฟอร์มิก จากนั้นทำยางก้อนที่ได้ให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่อง pelletiser จะได้ยางเม็ด (crumbs) เติมน้ำมันละหุ่งเพื่อป้องกันยางเม็ดติดกัน ข้อดีของเครื่อง pelletiser เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมืออื่นๆ คือมีเครื่องรีดเรียบ (smooth roll crepers) และอุปกรณ์ตัดย่อย (shredders) ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการกระจายขนาดอนุภาคต่ำ แต่ข้อเสียคือเป็นเครื่องมือขนาดเล็ก ขนาดของรูในแผ่นแบบ (die-plate) มีขนาด 4 มิลลิเมตรถึง 3 มิลลิเมตร

การปรับผิวด้วยสารเคมีมี 2 วิธีคือการเติมคลอรีน (chlorination) และโบรมีน (bromination) วิธีเติมคลอรีนนิยมใช้มากกว่าเพราะว่าเป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีเติมโบรมีนโดยเติมสารโซเดียมไฮโปคลอไรต์และกรดเกลือลงในยางเม็ดโดยตรงและกระจายอยู่ในน้ำ ทำยางเม็ดที่ได้ให้แห้งโดยเครื่องอบแห้งซึ่งใช้อากาศหมุนเวียนแบบกะ ถ้าผลิตเม็ดยางจากแผ่นแบบที่มีรูขนาด 3 มิลลิเมตรจะอบแห้งที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 19 ชั่วโมง หรือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง สำหรับเม็ดยางจากแผ่นแบบที่มีรูขนาด 4 มิลลิเมตร

จะอบแห้งที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 38 ชั่วโมง หรืออุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 10 ชั่วโมง สำหรับวิธีเติมโบรมีนจะใช้สารละลายโบรมีนที่เตรียมจากโซเดียมโบรมไนด์ โซเดียมโบรมเมตและ กรดกำมะถัน (pH=4) เติมลงในยางเม็ดซึ่งกระจายอยู่ในน้ำ

ยางเม็ดที่ได้มีปริมาณคลอรีนร้อยละ 0.35 โดยน้ำหนัก ประสิทธิภาพของการเติมคลอรีนต่ำเพราะคลอรีนละลายในน้ำได้น้อย อย่างไรก็ตามปริมาณคลอรีนในระดับนี้ทำให้ยางมีสมบัติต้านทานการจับตัวกันขณะเก็บได้ดีมาก และที่ระดับปริมาณคลอรีนสูงขึ้น ทำให้ยางมีค่า plasticity retention index ต่ำกว่าร้อยละ 60 และความหนืดมูนิต่ำกว่ายางที่ไม่เติมคลอรีน

การแยกขนาดอนุภาคยางด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐานแสดงผลในตาราง 2.9[32]

ตาราง 2.9 แสดงการกระจายขนาดอนุภาค

ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	รูปแบบ 3 มิลลิเมตร	รูปแบบ 4 มิลลิเมตร
>6	-	4
4-6	25	65
2-4	73	31
<2	2	-

3. การตัดย่อยยางธรรมชาติ

การเตรียมยางผงโดยวิธีตัดย่อยเป็นวิธีที่คิดค้นโดยบริษัท Blackfriars Engineering Co.,Ltd เครื่องจักรที่ใช้คือโม่มีดหมุน 3 โม่ซึ่งทำให้ตัดได้แบบกรรไกร มีแรงขับเคลื่อนมอเตอร์ 18.75 กิโลวัตต์ หมุนให้โม่มีความเร็ว 1,500 รอบ/นาที ติดตั้งโม่มีดไว้ชิดกันประมาณ 0.05-0.10 มิลลิเมตร ในระบบประกอบด้วยเครื่อง cyclone เป็นระบบเปิด ระวังมิให้ถึงรับยางอยู่ใกล้กับทางออกของ cyclone มากเกินไปเพราะยางจะสัมผัสกับอากาศ และอากาศจะพัดทำให้แป้ง ผุ่น และยางผลิตภัณฑ์ผสมปนกันออกมาได้ ทั้งนี้ใช้โม่มีดผลิตภัณฑ์(อุณหภูมิประมาณ 21-24 องศาเซลเซียสในฤดูหนาว และประมาณ 27-29.5 องศาเซลเซียสในฤดูร้อน) จะต้องเย็นตลอดเวลาเพื่อไม่ให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของยางผลิตภัณฑ์และมีแป้งเป็นสารป้องกันการติดกัน

การตัดย่อยเป็นวิธีที่ละเอียดและประณีตมาก การให้อัตราการป้อนสารเข้ามากเกินไปเพื่อให้ได้ผลผลิตมาก หรือการขาดสารป้องกันการจับก้อน (partitioning agent) จะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นในเครื่องตัดได้ ตัวอย่างการเตรียมยางทำโดยให้ยางแห้ง 0.5 กิโลกรัมที่เติมแป้งทุกๆ 1.5-2 นาที จำนวน 25 กรัม ใส่ลงในเครื่องตัดและเครื่องตรวจวัดจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

ยางเม็ดกับเวลาออกมาเป็นกราฟ ที่อัตราการป้อนต่ำจะทำให้เครื่องตัดทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งได้อัตราการป้อนที่เหมาะสม การทำงานจะเข้าสู่ระบบสมดุล

ตัวอย่างยางเม็ดที่ได้นำมาวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐานเขย่าอัตโนมัติ 10 นาที ผลวิเคราะห์แสดงว่าการกระจายขนาดอนุภาคขึ้นอยู่กับขนาดตะแกรงเครื่องตัด (Blackfriars granulator) สามารถผลิตอนุภาคยางให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4-16 มิลลิเมตร ส่วนขนาด 2 มิลลิเมตรมีอยู่เล็กน้อย เมื่อนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณถ้าพบว่าขนาดอนุภาคยางลดลงเมื่อปริมาณแบ่งที่ใช้เพิ่มขึ้น ปริมาณการใช้แบ่งขึ้นอยู่กับขนาดของตะแกรงในเครื่อง แสดงว่าการที่อนุภาคยางอยู่ในห้องตัดย่อยเป็นเวลานานจะมีโอกาสผลมกับแบ่งได้มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้แบ่งปริมาณมากขึ้น

4. การบดในสภาพแช่แข็ง

การบดยางแท่งที่ทำให้เย็นจัดด้วยไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิต่ำมากเช่นนี้ ยางจะเปราะจนสามารถบดให้เป็นชิ้นเล็กลงได้ตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งในการเตรียมยางผง จำเป็นต้องเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารป้องกันการจับก้อนได้แก่ สารพวกซิลิกา ดินขาว ผงคาร์บอนดำ และแบ่งเป็นต้น สารนี้มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผงยางจับตัวกันหลังจากเป็นชิ้นเล็กๆ แล้ว โดยการเลือกใช้สารเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพ ต้องเลือกชนิดและปริมาณของสารให้เหมาะสมกับยางแต่ละชนิด

นำยางผงที่เตรียมได้ไปเก็บไว้ในถังเก็บ เมื่อต้องการใช้จึงนำมาผสมกับสารเคมีหรืออาจผสมยางผงกับสารนั้นเสียก่อนจึงนำไปเก็บที่หลังก็ได้ ซึ่งในการผสมยางผงกับสารที่เติมลงไปสามารถทำได้อย่างสะดวกและใช้เวลาน้อย โดยจะใช้เครื่องผสมเรียกว่า Turbo-rapid mixer (รูป 2.9) เครื่องผสมชนิดนี้เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อให้การผสมยางผงกับผงของสารที่จะเติมลงไปตลอดจนสารอื่นๆเช่น น้ำมันที่ช่วยในขั้นการผลิต ได้อย่างทั่วถึงในเวลาอันสั้น อาจเรียกการผสมแบบนี้ว่า dry blending เนื่องจากของผสมจะอยู่ในลักษณะเป็นผง เมื่อผสมเสร็จแล้วของผสมที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องมือชนิดอื่น หรือนำไปเก็บไว้ในถังเก็บต่อไป ข้อดีของ Turbo-rapid mixer นี้ นอกจากจะผสมได้เร็วกว่าเครื่องผสมที่ใช้กับยางแท่งทั่วไปถึง 3-4 เท่าแล้ว ยังสามารถออกแบบให้มีเครื่องห่อหุ้ม (jacket) ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิขณะผสมได้อีกด้วย เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานได้มาก

จากการศึกษาพบว่าลำดับของการเติมสารต่างๆ เพื่อผลมกับยางผงมีความสำคัญมากต่อการกระจายของผงยาง โดยจะยกตัวอย่างระบบหนึ่งซึ่งแสดงลำดับขั้นตอนการเติมสารที่ต้องการลงไปผลมกับยางผงแล้วได้ยางผงที่ผลมแล้วที่มีคุณภาพที่ดีดังนี้

1 นาที ใช้ความเร็วต่ำ เต็มสารผสมที่เป็นผง และยางผง

1.5 นาที ใช้ความเร็วสูง

0.5 นาที ปิดเครื่อง แล้วเริ่มใหม่ใช้ความเร็วต่ำ

0.5 นาที เต็มพวบน้ำมัน และสารอื่น

0.5 นาที ใช้ความเร็วต่ำ

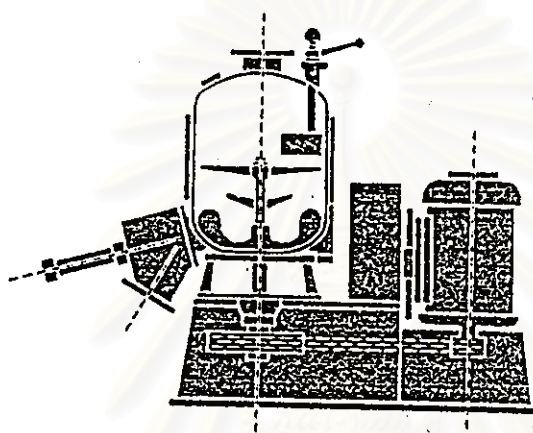
ในหนึ่งรอบนี้จะได้อย่างที่ผสมแล้วที่ไม่จับตัวกัน สามารถเก็บไว้ได้โดยคุณภาพไม่เปลี่ยนแปลงนานถึง 2 ปี เนื่องจากยางผงที่ผสมแล้วนี้ประกอบด้วย ยางเป็นแกนกลางหุ้มด้วยสารที่เติมลงไป เช่น สารที่ช่วยให้ยางอ่อนตัว (plasticiser) ช่วยในการผลิตสารวัลคาไนซ์ ทำให้ยางไม่ถูกเปลี่ยนแปลงได้ง่ายจากสภาวะแวดล้อม และการที่สารวัลคาไนซ์อยู่ห่างจากส่วนที่เป็นยางก็ยิ่งช่วยไม่ให้เกิดการวัลคาไนซ์ของยางก่อนอีกด้วย

ในกรณีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ จะนำยางที่ผสมแล้วไปผสมในขั้นสุดท้ายอย่างสมบูรณ์โดยอาจใช้เครื่องรีดยาง หรือเครื่อง internal mixer แล้วนำไปขึ้นรูป หรืออาจนำยางที่ผสมแล้วนี้ไปยังเครื่องผลิตผลิตภัณฑ์ เช่นเครื่องรีด (extruder) เครื่องฉีด (injection moulding machine) หรือเครื่องอัดแบบ (compression moulding machine) ได้เลย

นอกจากนี้แล้ว ยังมีการพัฒนาในเทคโนโลยีของยางผงอีกโดยการทดลองใช้ยางผงในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องโดย Farrel-Bridge, castleton, UK ได้นำเครื่องจักรที่เรียกว่า MVX (mixing-venting-extruding) มาใช้ โดยจะส่งยางผงเข้าไปผสมกับสารต่างๆ ภายในเครื่อง แล้วใช้ความดันส่งยางที่ผสมแล้วต่อไปยัง extruder อย่างต่อเนื่องกันเป็นขั้นตอนเดียว การทดลองได้เริ่มทำโดย Crusoe โดยใช้ยางผงจาก Plascoat systems Ltd พบว่าการใช้ MVX สามารถทำได้โดยสะดวกให้ผลผลิตมากประมาณ 400-500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้พบว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดี และการกระจายของสารที่ผสมกับยางผงก็เป็นไปอย่างทั่วถึง

ต่อมา Werner และ Pfeiderer ได้ทดลองใช้กรรมวิธีผลิตแบบต่อเนื่องนี้ด้วยเครื่อง EVX ซึ่งต่างจาก MVX ตรงที่ใช้เครื่องอัดที่มีเกลียวคู่ (twin screws) แทนเครื่องผสมที่ใช้ใบพัด และได้ผลผลิตประมาณ 200-1,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

นับว่า MVX และ EVK เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์เหมาะที่จะใช้ยางผงเป็นวัตถุดิบแล้วผสมแบบขั้นเดียวอย่างต่อเนื่องในระยะเวลาอันสั้น ให้ผลผลิตสูง สามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องได้โดยไม่ต้องกังวลเรื่องการสะสมความร้อนของยาง จึงสามารถใช้ได้อย่างสะดวกและปลอดภัย



รูป 2.9 Turbo-rapid mixer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 งานวิจัยในอดีต

W. Majewski และคณะได้ศึกษาการแยกสกัดส่วนของน้ำมันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส ความดัน 100-250 บาร์ โดยเครื่องมือแบบกะสามารถแยกสกัดส่วนไตรกลีเซอไรด์และสกัดคลอโรลเรสเทอรอลได้ พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการสกัดคลอโรลเรสเทอรอลคือที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 150-175 บาร์ สามารถสกัดได้ร้อยละ 35[33]

K. Udaya Sankar และ B. Manohar ศึกษาการสกัดขิงโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤตที่ความดัน 8, 10, 12 MPa ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 องศาเซลเซียส และศึกษาสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารที่ได้ รวมทั้งหาปริมาณสารที่ไม่ระเหย โดยศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลซึ่งใช้รูปแบบไม่คงที่ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1.58×10^{-8} ถึง 43.24×10^{-8} กิโลกรัมต่อตารางเมตร-วินาที และมีค่าลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น[34]

Schultz, W.G. บันทึกการสกัดองค์ประกอบที่มีกลิ่นหอมของผลไม้ (fruit aroma constituent) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ปิดัดมาได้เปรียบเทียบกับการสกัดสารที่ระเหยง่ายของแอปเปิ้ลด้วยตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ ไอโซเพนเทน ไดเอทิลอีเทอร์ คาร์บอนไดออกไซด์เหลว และ 1,2 ไดคลอโร-1,1,2,2-เตตระฟลูออโรอีเทน[35]

Brunner, G., ศึกษาผลของสารตัวที่สาม (entrainers) ที่มีต่อการละลายของสารผสมเฮกซะเดคานอล (hexadecanol) และออกตะเดเคน (octadecane) พบว่าสารชนิดที่สามที่ใส่ลงไปในระบบของคาร์บอนไดออกไซด์มีผลทำให้พฤติกรรมของเฟสเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน[36]

J. Leveque ศึกษาการเตรียมยางเม็ดธรรมชาติจากการจับตัวกันของน้ำยางโดยวิธีการ atomization และเติมกรดลงไปเพื่อเกิดการรวมตัวของยาง เมื่อได้ยางเม็ดแล้วจึงเติมสารป้องกันการจับก้อนของเม็ดยาง[32]

M. Pike ศึกษาการเตรียมยางผงด้วยวิธีการฉีดแห้ง (spray dried latex) โดยนำน้ำยางมาทำให้มีความเสถียรเพิ่มขึ้น แล้วทำให้เป็นครีม (creaming) ก่อนนำมาฉีดด้วยอากาศร้อนประมาณ 200 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วส่งไปเก็บ วิธีนี้ใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาทีเท่านั้นก็จะได้อย่างผงในที่สุด [32]

ปีพ.ศ. 2535 พรฤดี มุ่งสมานกุล ศึกษาการชะละลายเม็ดยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยทำการทดลองที่สภาวะวิกฤต พบว่าที่บริเวณสภาวะวิกฤตนี้เม็ดยางจะบวมพองมาก ทำให้มีผลต่อการลดลงของปริมาณไนโตรเจนในเม็ดยาง [37]

ปีพ.ศ. 2538 ชาญศักดิ์ คำมาตร ศึกษาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติด้วยเมทิลเมทาคริเลต ในคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะพาโมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตที่ผิวของยางแพร่เข้าไปในเนื้อยางและเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ขึ้นบริเวณพันธะคู่ของสายไฮโซพรีน[38]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 การถ่ายเทมวล (mass transfer)

ปรากฏการณ์ถ่ายเทมวลพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางอุตสาหกรรมหลายประเภท ตัวอย่างเช่น การกลั่น การอบแห้ง การสกัด การแยกสารมลพิษออกจากของเสีย การแพร่ของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ตลอดจนกระบวนการชีวเคมี เช่น การหมัก เป็นต้น

การถ่ายเทมวล หมายถึง การที่องค์ประกอบหนึ่งในของผสมเคลื่อนที่จากบริเวณหนึ่งไปยังบริเวณอีกบริเวณหนึ่ง หรือมีผลต่างของความเข้มข้น ทั้งนี้สามารถแบ่งกลไกการถ่ายเทมวลเป็น 2 แบบคือแบบที่ 1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแบบสุ่ม ในตัวกลางซึ่งไม่เคลื่อนที่หรือตัวกลางที่มีการไหลแบบลามินาร์ ในกรณีที่เป็นแก๊ส โมเลกุลอาจมีการชนกันแล้วเคลื่อนที่ต่อไป การแพร่ของโมเลกุลซึ่งมีผลต่างความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน เรียกว่า การแพร่ธรรมดา (ordinary diffusion) การแพร่ของโมเลกุลอาจเกิดขึ้นเนื่องจากความดันซึ่งแตกต่างกัน เรียกว่า การแพร่ความดัน (pressure diffusion) ตัวอย่างเช่นในการแยกโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง ส่วน soret effect หรือ thermal diffusion effect คือการแพร่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ใช้ประโยชน์ในการแยกไอโซโทป การแพร่ซึ่งเกิดจากแรงภายนอก แรงเคลื่อนไฟฟ้า แรงแม่เหล็ก เรียกว่า force diffusion ตัวอย่างเช่น การแยกสารละลายอิเล็กโตรไลต์โดยใช้ไฟฟ้า ส่วน Knudsen diffusion เป็นการแพร่ของแก๊สผ่านรูพรุนขนาดเล็ก แบบที่สองคือ การพามวล (convective mass transfer) เป็นการถ่ายเทมวลซึ่งอาจจะเกิดขึ้นระหว่างของไหลซึ่งเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิว หรือระหว่างของไหลเคลื่อนที่สองชนิดซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกัน การพามวลจึงขึ้นอยู่กับสมบัติเกี่ยวกับการไหลและลักษณะทางพลศาสตร์ของของไหลซึ่งเคลื่อนที่ ในการพามวลสามารถจำแนกการไหลของของไหลเป็น 2 แบบคือ การที่ของไหลเคลื่อนที่หรือไหลเพราะแรงกระทำเช่น โดยอาศัยปั๊มหรืออุปกรณ์อื่นเรียกกระบวนการนั้นว่า การพามวลแบบบังคับ (forced convection) ส่วนการเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มข้น หรือความหนาแน่นเป็นการพามวลแบบธรรมชาติ (natural convective)

การถ่ายเทมวลในตัวกลางกึ่งอนันต์ (mass transfer into a semi-infinite medium)

การถ่ายเทมวลแบบสภาวะไม่คงตัวไปสู่ตัวกลางกึ่งอนันต์ที่ความเข้มข้นที่พื้นผิวมีค่าคงที่ ในช่วงเวลาสั้นๆ มวลที่เข้าไปที่พื้นผิวของตัวกลางด้าน $x=0$ จะไม่สามารถแพร่ไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งที่ $x=L_x$ ได้ ดังรูป 2.10 ดังนั้นตัวกลางจึงเป็นตัวกลางอนันต์ในทิศทาง x และจะใช้สภาวะ

$$C \rightarrow C_2 \quad \text{ในขณะที่} \quad x \rightarrow \infty$$

แทนที่จะใช้ $C = C_2$ ที่ $x=Lx$ และมีสภาวะเริ่มต้นที่ $t=0$ คือ

$$C = \begin{cases} C_2 & x > 0 \\ C_1 & x = 0 \end{cases}$$

และมีสภาวะขอบเขตที่ $x=0$ คือ

$$C = C_1 \quad t > 0$$

จากรูป 2.10 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง θ กับ x ที่เวลา t_1 และ t_2 ซึ่งมีเส้นกราฟลักษณะเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่เวลา t_2 มวลสามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวกลางได้มากกว่า t_1 ดังนั้นเส้นกราฟแต่ละเส้นจะแตกต่างกันตรงที่ระยะทางที่แทรกซึมเข้าไปได้ $\delta(t)$ โดย

$$\xi \equiv \frac{x}{\delta(t)}$$

พิจารณาที่ $\theta = \theta_p$ ในรูป 2.11 θ_p ที่เวลา t_1 เกิดขึ้นที่ระยะทาง x_1 และที่เวลา t_2 เกิดขึ้นที่ระยะ x_2 ถ้าเขียนในรูป $\delta(t)$ จะได้ $x_1 / \delta_1(t_1) = x_2 / \delta_2(t_2) = \xi_p$ และทั้งสองจุดก็เขียนได้เป็น $\theta_p(\xi_p)$ เราสามารถกำจัดตัวแปร x และ t ไปและได้สมการอนุพันธ์ดังนี้

$$\alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = \frac{\partial \theta}{\partial \xi}$$

(2.9)

โดยที่

$$\theta \equiv \frac{C - C_2}{C_1 - C_2}$$

เมื่อ θ คือความเข้มข้นไร้หน่วย

เนื่องจากสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตคือ

$$C = \begin{cases} \rightarrow C_2 & x \rightarrow \infty \\ = C_2 & t = 0, x \geq 0 \\ = C_1 & x = 0, t \geq 0 \end{cases}$$

จากการแก้สมการโดยการรวมตัวแปรและจัดเรียงสมการใหม่จะได้ว่า

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + 2\xi\frac{d\theta}{d\xi} = 0$$

(2.10)

เมื่อ

$$\xi \equiv \frac{x}{\delta(t)}$$

และ

$$\delta = \sqrt{4\alpha t}$$

จากสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตจะได้ว่า

$$\theta = 0 \text{ ที่ } \xi = \infty$$

$$\text{และ } \theta = 1 \text{ ที่ } \xi = 0$$

โดยการใช้ Laplace transformation และวิธีการแยกตัวแปร คำตอบคือ

$$\theta = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-z^2} dz \equiv 1 - \operatorname{erf}\xi \equiv \operatorname{erfc}\xi$$

$$\theta = \frac{C - C_2}{C_1 - C_2} = 1 - \operatorname{erf}\xi$$

(2.11)

ที่เวลานานพอ กล่าวคือ

ดังนั้น

$$t \rightarrow \infty$$

$$\xi \rightarrow 0$$

และ

$$\theta_\infty \rightarrow 1$$

จะได้

$$\frac{\theta}{\theta_{\infty}} = \frac{C - C_2}{C_{\infty} - C_2} = \frac{1 - \operatorname{erf}\xi}{1 - \operatorname{erf}\xi_{\infty}}$$

ดังนั้น

$$\theta = \frac{C - C_2}{C_{\infty} - C_2} = 1 - \operatorname{erf}\xi$$

$$C - C_2 = (C_{\infty} - C_2)(1 - \operatorname{erf}\xi)$$

$$= C_{\infty}(1 - \operatorname{erf}\xi) - C_2(1 - \operatorname{erf}\xi)$$

$$C = C_{\infty}(1 - \operatorname{erf}\xi) + C_2 \operatorname{erf}\xi$$

เมื่อเริ่มปล่อยให้สารอินทรีย์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อยาง ที่ระยะห่างจากผิวยาง สารอินทรีย์ยังแทรกเข้าไปไม่ถึง ดังนั้น

$$C_2 = 0$$

ในช่วงเวลานั้นปริมาณสารอินทรีย์ที่แทรกซึมเข้าไปจึงแสดงได้ดังนี้

$$C = C_{\infty}(1 - \operatorname{erf}\xi)$$

(2.12)

สมมติฐานการถ่ายโอนไอโซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอลเข้าไปในยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

ยางแผ่นธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองถ่ายโอนไอโซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอล เป็นยางแผ่นที่เตรียมจากน้ำยางสดและผ่านกรรมวิธีการทำแห้งจนได้เป็นยางแผ่นผืนแห้ง ตัวอย่างยางที่ใช้ในการทดลองมีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ภายในเนื้อยางประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆมากมาย

ดังนั้นเมื่อเกิดการแทรกซึมสารเข้าไปในแผ่นยางธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่แทรกซึมเข้าไปได้กับระยะทางการแทรกซึมแสดงดังรูป 2.12 คือในช่วงแรกระยะทางสั้น ปริมาณสารที่แทรกซึมเข้าไปมีไม่มาก แต่เมื่อระยะทางการแทรกซึมเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการแทรกซึมเข้าไปในยางจะเริ่มลดลง ที่ระยะห่างจากผิว สารดังกล่าวยังแทรกซึมเข้าไปไม่ถึง

ในการทดลองไม่สามารถจะวัดปริมาณการแทรกซึมของสารเข้าไปในยางธรรมชาติที่ระยะทางต่างๆได้ วัดได้เพียงปริมาณการแทรกซึมเฉลี่ยของระยะทางทั้งหมด ดังนั้นจึงใช้สมการ (2.12) ซึ่งใช้ค่า C_1 แทนดังนี้

$$C_t = C_\infty (1 - \text{erf} \xi)$$

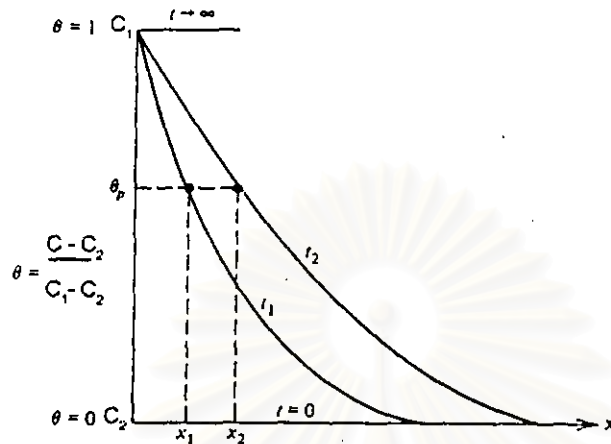
(2.13)

เมื่อ C_t = ปริมาณการแทรกซึมเฉลี่ยที่เวลาใดๆ (phr)
 C_∞ = ปริมาณการแทรกซึมเฉลี่ยที่ เวลา t_∞ (phr)

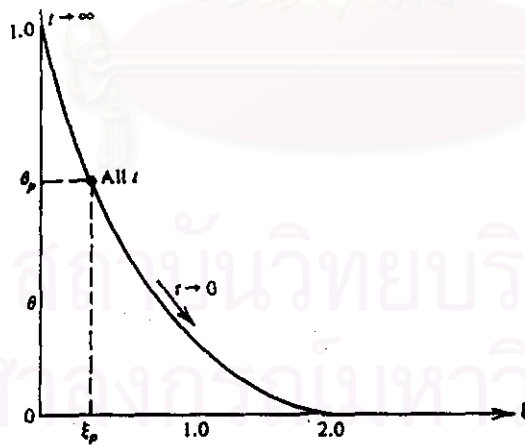
สมมติฐานในการวิจัยนี้คือ ในอนุภาคยางประกอบด้วยโมเลกุลของสายไอโซพรีนมากมาย มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาว เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ขดงอไปมา ที่ปลายทั้งสองข้างของแต่ละโมเลกุลเป็นสารโปรตีนและกรดไขมัน เชื่อมต่อแต่ละโมเลกุลอยู่ดังรูป 2.13 เมื่อผ่านคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในยางธรรมชาติ อนุภาคยางจะพองตัวขยายใหญ่ขึ้น เนื่องจากสายไอโซพรีนแต่ละสายพันกันอยู่ เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์แทรกซึมเข้าไปล้อมรอบสายไอโซพรีนจึงทำให้เกิดระยะห่างระหว่างกันมากขึ้น ช่วยให้การแทรกซึมของสารผ่านเข้าไปได้ง่ายขึ้น ในขณะเดียวกัน คาร์บอนไดออกไซด์จะแทรกซึมลึกเข้าไปในเนื้อยาง ก็จะทำให้สารอินทรีย์เข้าไปในยางด้วย ทั้งนี้เพราะคาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีความหนืดน้อย เมื่อผสมกับสารอินทรีย์จึงทำให้สารอินทรีย์นั้นมีความหนืดลดลง

โพรพาราฟิน (paraffin wax) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายตรง (straight chain hydrocarbon) เป็นส่วนใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลมีค่าอยู่ในช่วง 360-420 เมื่อแทรกซึมเข้าไปในยาง โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา โพรพาราฟินจะเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลยาง ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^6 ในส่วนที่มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนเหมือนกัน ทำให้เกิดการเสริมความต้านทานแรงดึงในยาง เนื่องจากโพรพาราฟินมีโครงสร้างเป็นผลึก ขณะที่ล้อมรอบอยู่ที่โมเลกุลยาง จะไปบังคับสายไอโซพรีนของยางดังรูป 2.14 และเนื่องจากโมเลกุลยางไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (non-homogeneous) การแทรกซึมของโพรพาราฟินเข้าไปในเนื้อยางแต่ละส่วนไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการจัดตัวของโครงสร้างแบบกระจาย ยางจึงยืดออกได้น้อยลงก่อนจะขาด เนื่องจากผลึกโพรพาราฟินไปขัดขวางการยืดออกของสายไอโซพรีน

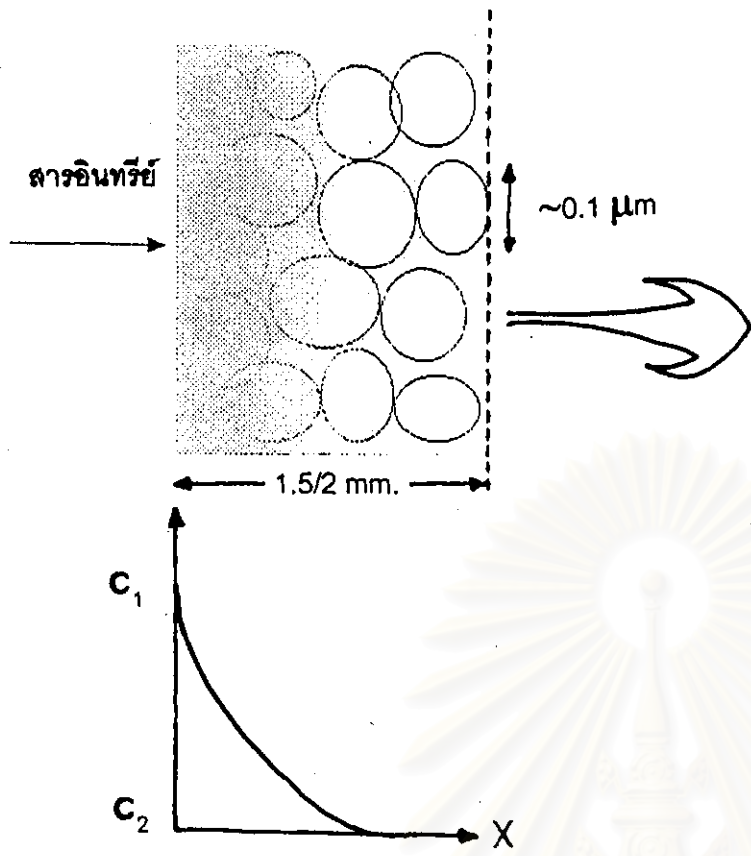
โพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol) เป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ เป็นโมเลกุลขนาดเล็กและมีขั้ว ซึ่งต่างจากโพรพาราฟินที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนเพียงอย่างเดียว โพรพิลีนไกลคอลสามารถแทรกซึมเข้าไปในยางได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโพรพาราฟิน แต่เมื่อมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา โพรพิลีนไกลคอลจะแทรกซึมเข้าไปได้มากขึ้นโดยไปล้อมรอบที่ปลายสายไอโซพรีนที่เป็นไขมันและโปรตีนเพราะเป็นสารที่มีขั้วดังรูป 2.15 การที่มีโพรพิลีนไกลคอลที่ปลายสายไอโซพรีน ช่วยให้มีกาวยืดออกได้มากขึ้นก่อนที่จะขาด



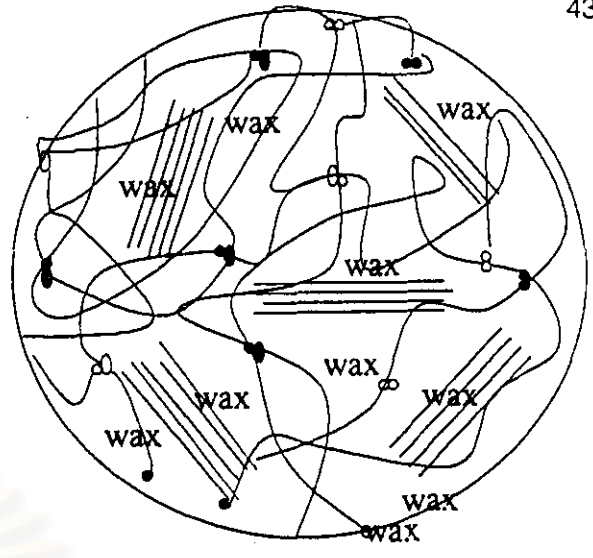
รูป 2.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เวลาสั้นๆ สองจุด



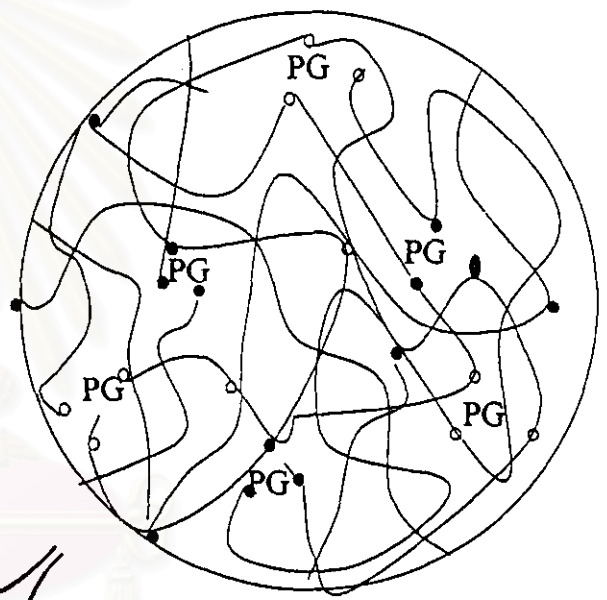
รูป 2.11 ความคล้ายคลึงกันเมื่อเปลี่ยนตัวแปร



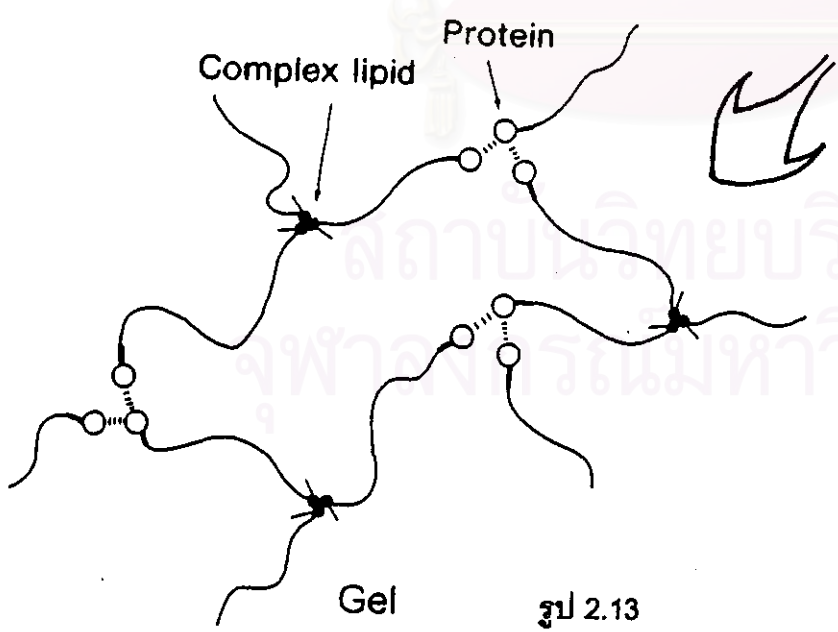
รูป 2.12



รูป 2.14



รูป 2.15



รูป 2.13

ภาพแสดงการถ่ายเทมวลสารเข้าไปในอนุภาคยางธรรมชาติ