

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา การกราฟต์โคโพลิเมอร์ของยางธรรมชาติด้วยเมทิลเมทาคริเลต ในคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือวิกฤต งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ การเตรียมยางแผ่นเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ, การพิสูจน์สมมุติฐานการกราฟต์โคโพลิเมอร์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์, การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และเวลา ในการกราฟต์โคโพลิเมอร์ ที่มีผลต่อปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์, การเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของยางที่ผ่านการกราฟต์โคโพลิเมอร์แล้ว และสมบัติทางฟิสิกส์ของยางผลิตภัณฑ์ในรูป กาว (adhesive rubber)

ลักษณะยางแผ่นเริ่มต้น

ในงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์หลักที่ใช้ยางแผ่น เนื่องจากต้องการศึกษาลักษณะการกราฟต์โคโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในสถานะของแข็ง โดยทำการทดลองที่ความดันสูง เพื่อทดสอบสมมุติฐานที่ว่า เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าไปในเนื้อยาง จะทำให้ยางแผ่นมีลักษณะบวมและพองใหญ่ขึ้น แล้วทำให้คาร์บอนไดออกไซด์นี้เป็นตัวช่วยพาให้เมทิลเมทาคริเลตเข้าไปในเนื้อยางได้มากขึ้น และเกิดทำปฏิกิริยากับโพลีไอโซพรีนได้ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์มากขึ้นด้วย

การทดลองเริ่มด้วย การนำน้ำยางพันธุ์ RRIM 600 มาทำเป็นยางแผ่นแล้วจึงศึกษาคุณสมบัติเริ่มต้น ได้แก่ค่า ปริมาณสิ่งสกปรก, ปริมาณเถ้า, ปริมาณไนโตรเจน, ปริมาณสิ่งระเหย และนำไปหาค่าสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ การวัลคาไนซ์ของยาง เพื่อไว้เปรียบเทียบกับยางที่ผ่านการกราฟต์โคโพลิเมอร์แล้ว ได้แก่ ค่า specific gravity , hardness , tensile strength , tear , elongation at break และ 100% , 300% , 500% modulus รายละเอียดดังตารางที่ ค 1 และ 2 ในภาคผนวก ค



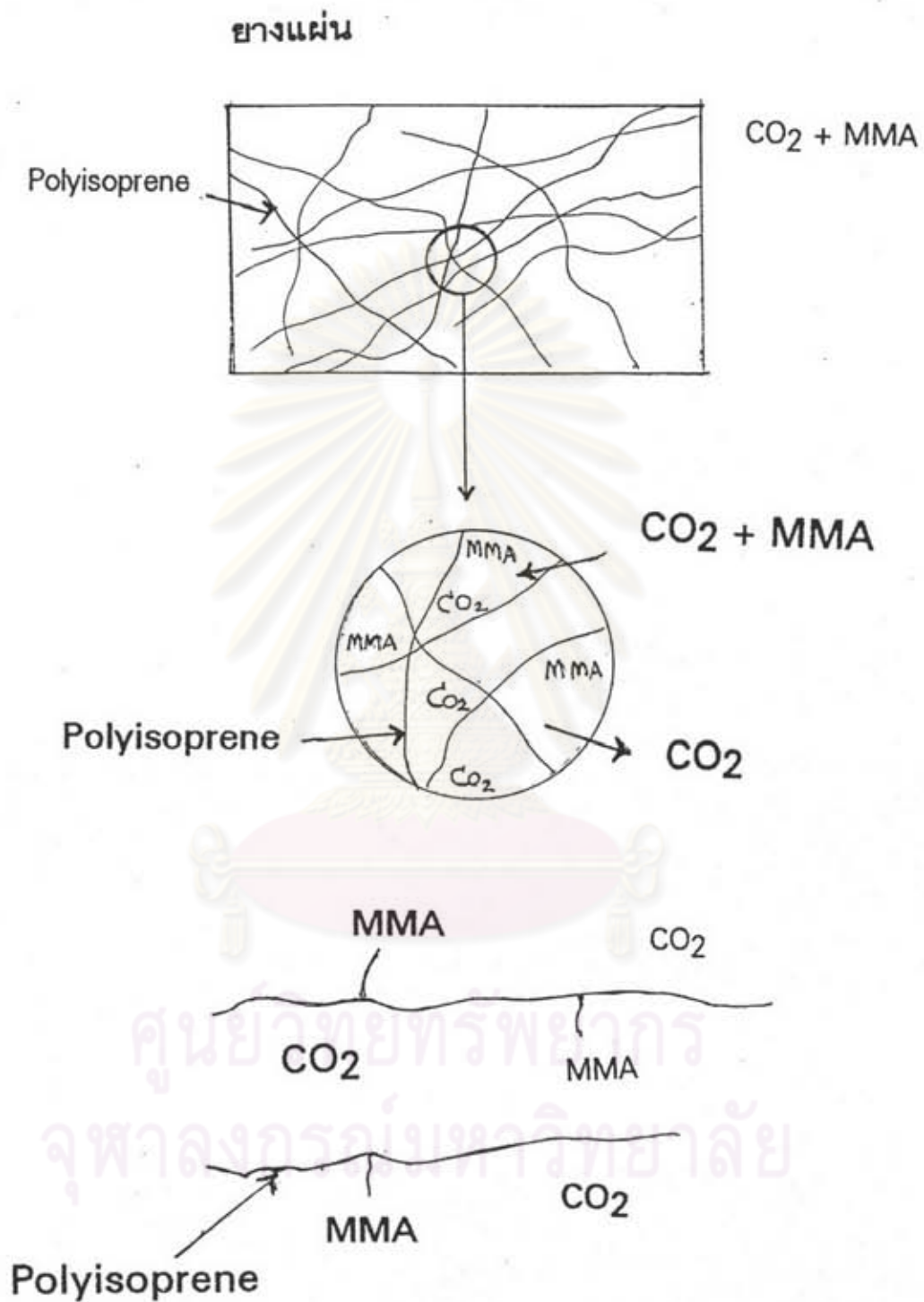
สมมุติฐาน การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์

โดยทั่วไปยางธรรมชาติ จะประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีหน่วยไอโซพรีนต่อเป็นสายยางเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ถ้าพิจารณาโครงสร้างโมเลกุลของยาง จะเห็นว่ายางมีส่วนที่เป็นพันธะคู่ โดยตำแหน่งพันธะคู่นี้ สามารถแตกออกหรือเข้าทำปฏิกิริยากับสารต่างๆได้ง่ายกว่าที่บริเวณอื่นๆ ขึ้นอยู่กับว่า สารที่เข้าทำปฏิกิริยามีโอกาสมากน้อยเพียงใดที่จะเข้าใกล้บริเวณที่เป็นพันธะคู่นี้ และเกิดการเข้าทำปฏิกิริยากันขึ้น

สมมุติฐานในงานวิจัยนี้ คือ เมื่อผ่านคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในแผ่นยางธรรมชาติ ยางแผ่นนี้จะพองตัวขยายใหญ่ขึ้น เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อยาง โดยที่โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะไปห้อมล้อมรอบๆโมเลกุลของยาง และแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโพลีไอโซพรีน แล้วทำให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลกว้างมากขึ้น จึงเกิดการแพร่เข้า-ออกของสารต่างๆผ่านทางคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี

ในขณะที่โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปแทรกตัวบนสายไอโซพรีน คาร์บอนไดออกไซด์ก็จะพาโมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตที่ผิวของยาง แพร่เข้าไปในเนื้อยาง ทำให้โอกาสที่เมทิลเมทาคริเลตจะเข้าไปใกล้กับส่วนที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย คือส่วนที่เป็นพันธะคู่มากขึ้น ดังนั้น การเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคโพลิเมอร์จึงเกิดที่บริเวณพันธะคู่ของสายไอโซพรีน โดยโมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตจะละลายอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์ ตามบริเวณช่องว่างระหว่างสายไอโซพรีนภายในเนื้อของยาง และเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งที่เป็นพันธะคู่จะเกิดปฏิกิริยากันระหว่างเมทิลเมทาคริเลตกับโพลีไอโซพรีนที่ตำแหน่งนั้นขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1

การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต เพราะว่าที่สภาวะนี้มีความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์สูง คือ มีปริมาตรต่อโมเลกุลต่ำ ทำให้สามารถเข้าไปแทรกตัวบนสายไอโซพรีนได้มาก และมีโอกาสที่โมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลต จะเข้าทำปฏิกิริยากับบริเวณพันธะคู่ของสายไอโซพรีนมากตามไปด้วย ต่างจากที่สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต ซึ่งจะอยู่ในสภาพที่คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่นต่ำกว่าจึงมีปริมาตรต่อโมเลกุลสูง ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถเข้าไปแทรกตัวบนสายไอโซพรีนได้น้อย จึงเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์โคโพลิเมอร์ได้น้อยด้วย



รูปที่ 5.1 แสดงสมมุติฐานการกราฟต์โคโพลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือวิกฤต

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

Addition



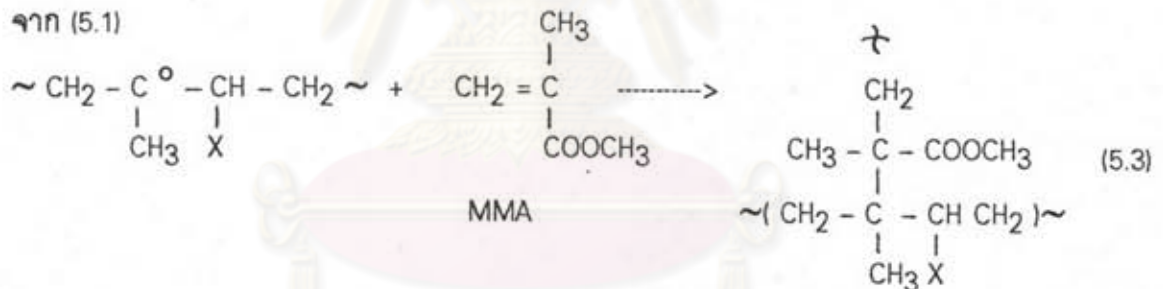
$\text{X}^\circ = \text{tert} - \text{Buthyl hydroperoxide}$

Hydrogen abstraction

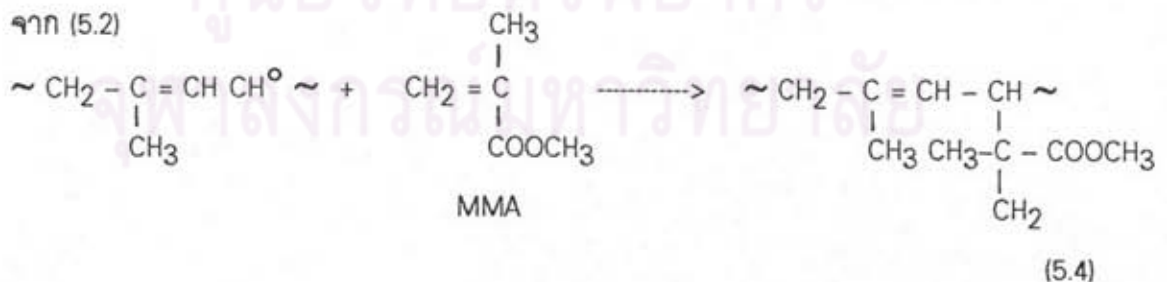


จากสมการ (5.1) และ (5.2) จะเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคโพลิเมอร์ไอโซพรีน ต่อไป

จาก (5.1)



จาก (5.2)



จากสมมุติฐานดังกล่าว สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ และปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ในแผ่นยางได้ในรูปสมการ ดังนี้
สมมุติฐานนี้อยู่ในสถานะของไหล และจะได้

$$[\text{ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์}] \propto [\text{ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่แทรกตัวในเนื้อยาง}]$$

และจากสมการการดูดซับ ได้

$$\lambda \propto f(P, T, [C_{mma}], [C_{rubber}])$$

เมื่อ

λ = ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ (Grafting Efficiency, %GE)

P = ความดัน, บาร์

T = อุณหภูมิ, องศาเซลวิน

$[C_{mma}]$ = ความเข้มข้นของเมทิลเมทาคริลิต, กรัม / กรัม

$[C_{rubber}]$ = ความเข้มข้นของยาง, กรัม / กรัม

เนื่องจาก $[C_{mma}]$, $[C_{rubber}]$ เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะฉะนั้น

$$\lambda \propto f(P, T)$$

ในงานวิจัยนี้ จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง P และ η

โดยที่ η = สัดส่วนของน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง

ดังนั้น

$$\lambda \propto f(\eta, T)$$

หรือ

$$\lambda = f_1(\eta) f_2(T_r) \quad (5.5)$$

โดยที่

$$\lambda_{(\eta)} = f_1(\eta)$$

$$\lambda_{(P)} = f_2(T_r)$$

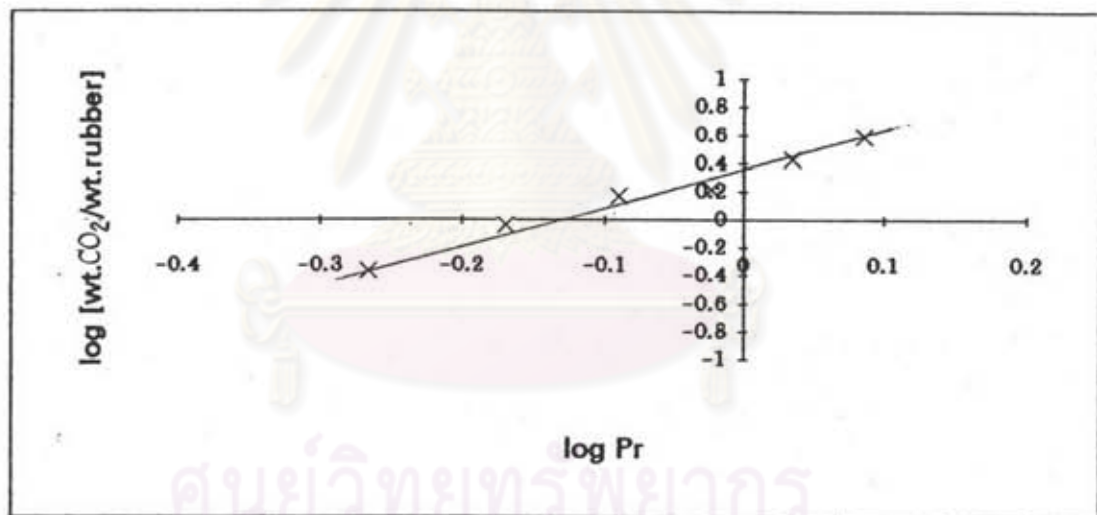
การหาความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ P_r

P_r = ความดันลดทอน = P / P_c . ($P_c = 73.8$ บาร์)

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง η กับ P_r จะได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ $y = a \cdot x^b$ หรือ $\log y = \log a + b \log x$ สามารถหาค่าคงที่ต่างๆจากกราฟรูปที่ 5.2

จาก linear regression จะได้ $\log a = 0.3475$ และ $b \log x = 2.5473 \log x$ ดังนั้น $a = 2.22$ โดยที่ R - squared เท่ากับ 0.97

ฉะนั้นได้ความสัมพันธ์ดังนี้ $\eta = 2.2 P_r^{2.5}$ (5.6)



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $\log \eta$ และ $\log P_r$ ในการหาสมการเส้นตรงในรูป $y = a \cdot x^b$

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\lambda_{(T)}$ กับ η

จาก Taylor series เขียนได้ว่า

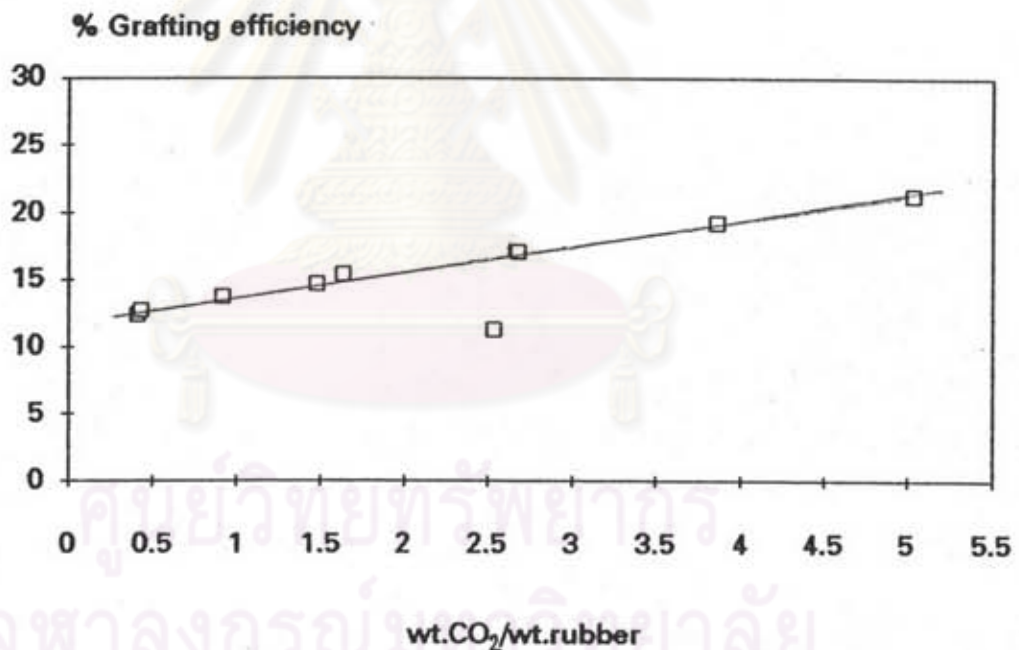
$$f_1(\eta) = a_0 + a_1\eta + a_2\eta^2 + \dots$$

ในที่นี้จะใช้เทอมที่มี η ยกกำลังไม่เกิน 1 เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง จะได้

$$f_1(\eta) = a_0 + a_1\eta$$

นำข้อมูลจากการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง $\lambda_{(T)}$ กับ η ที่อุณหภูมิคงที่ (35 องศาเซลเซียส) ดังรูปที่ 5.3 จะได้สมการเป็นเส้นตรง ในรูป $y = a + bx$ ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$\lambda_{(T)} = f_1(\eta) = a + K_1\eta \quad (5.7)$$



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ η ในการสมการในรูป $y = a + bx$

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง λ กับ T_r

จากสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยา

$$r_A \propto f_3 \text{ (องค์ประกอบ)}$$

$$r_A = k f_3 \text{ (องค์ประกอบ)}$$

$$r_A = k C_a^p C_b^q \quad (5.8)$$

โดยที่ $k = k_0 e^{(-E/RT)}$ จากกฎของอาร์เรเนียส

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็ว, กรัม/นาที

k_0 คือ แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor)

E คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy), แคลอรี/โมล

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

ให้ C_R = ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์

ดังนั้น
$$r_A = dC_R / dt = k C_a^p C_b^q$$

$$dC_R / dt = k_0 e^{(-E/RT)} C_a^p C_b^q$$

อินทิเกรต จะได้

$$\begin{aligned} C_R &= \int_0^t k_0 e^{(-E/RT)} C_a^p C_b^q dt \\ &= k_0 e^{(-E/RT)} \int_0^t C_a^p C_b^q dt \end{aligned}$$

เนื่องจาก ความเข้มข้น เปลี่ยนแปลงน้อยมากกับเวลา อาจถือได้ว่า เมื่อให้ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากันคือ t

$$C_R = k_0 e^{(-E/RT)} C_a^p C_b^q t$$

T_r = อุณหภูมิลดทอน = T/T_c , ($T_c = 31.06$ องศาเซลเซียส)

$$C_R = k_0 e^{(-E/RT_c T_r)} C_a^p C_b^q t \quad (5.9)$$

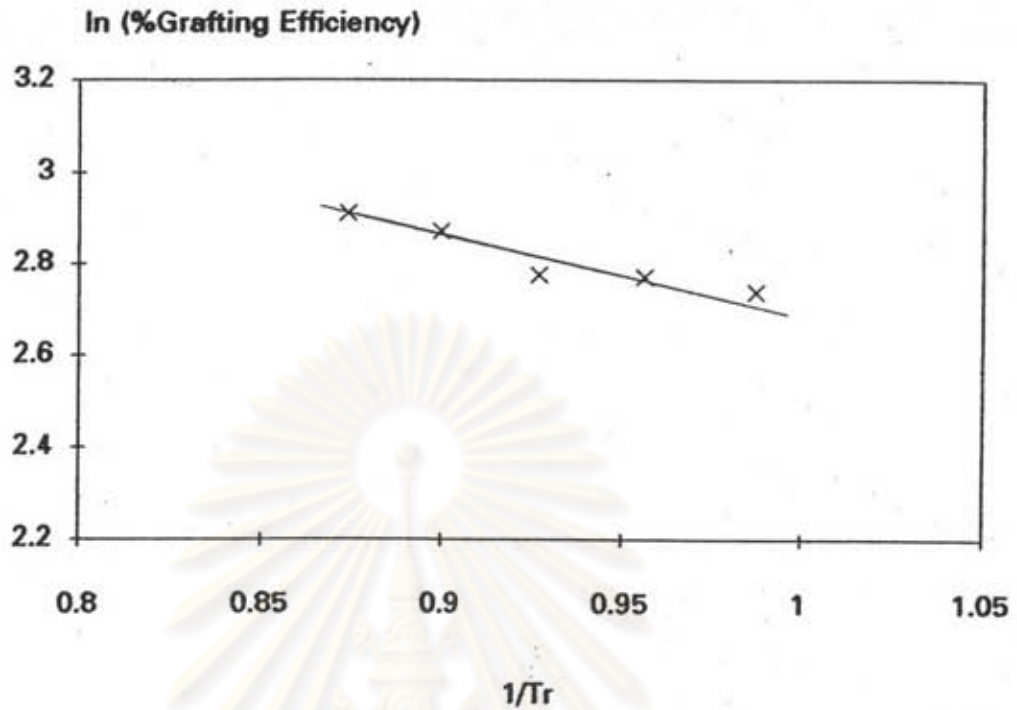
เมื่อความดันคงที่

$$\lambda_{(p)} \propto C_R$$

เพราะฉะนั้น

$$\lambda_{(p)} = k_2 e^{(-E/RT_c T_r)} \quad (5.10)$$

และ $k_2 = k_0 C_a^p C_b^q t$



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $\ln \lambda_{(p)}$ กับ $1/T_r$ ในการหาสมการเส้นตรงในรูปสมการเอ็กโปเนนเชียล

สมการ (5.10) จะอยู่ในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียล (exponential, $y = a \cdot e^{bx}$) นำข้อมูลจากการทดลองไปเขียนกราฟระหว่างค่า $\ln \lambda_{(p)}$ กับ $1/T_r$ ดังรูปที่ 5.4 เพื่อหาค่าคงที่ต่าง ๆ จาก $(\ln y = \ln a + bx)$

จาก linear regression จะได้ $\ln a = 0.47$ และ $b = 2.98$ โดยที่ R-squared เท่ากับ 0.98

$$\lambda_{(p)} = k_2 e^{(-3/T_r)} \tag{5.11}$$

จากสมการ (5.5) $\lambda = f_1(\eta) f_2(T)$

แทนค่า (5.7) และ (5.11) ในสมการ (5.5) จะได้

$$\begin{aligned} \lambda &= (a + K_1 \eta) (k_2 e^{(-3/T_r)}) \\ &= ak_2 e^{(-3/T_r)} + k_1 k_2 \eta e^{(-3/T_r)} \end{aligned} \tag{5.12}$$

เทอม 1

เทอม 2

เทอม 1 เป็นกรณีที่ทำกรรภาพดีโคโพลิเมอร์โดยไม่ผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ ($\eta = 0$) ซึ่งจากการทดลองได้ Grafting Efficiency (%GE) = 10

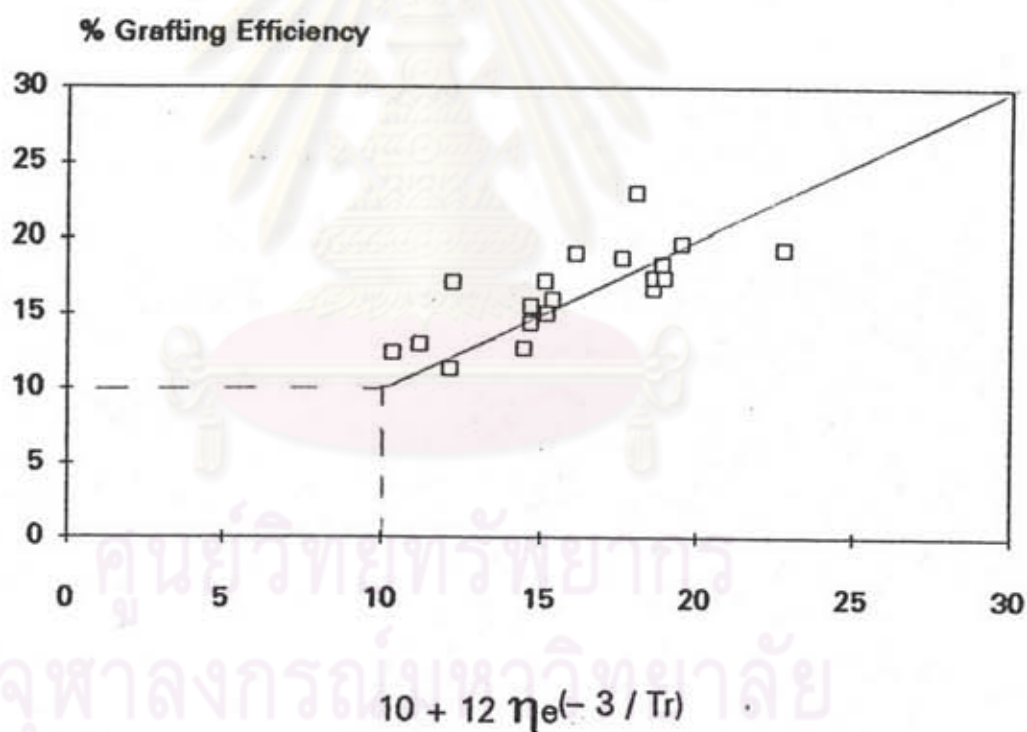
เทอม 2 เป็นกรณีที่ทำกรรภาพดีโคโพลิเมอร์โดยผ่านคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้สมการใหม่

$$\lambda = 10 + k_1 k_2 \eta e^{-3/T_r}$$

แล้วนำสมการสมมุติฐานที่ได้และข้อมูลการทดลองจริง สามารถนำมาเขียนกราฟในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ กับ $10 + k_1 k_2 \eta e^{-3/T_r}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.5

หาค่า $k_1 k_2 = 12$ จะได้ R-squared เท่ากับ 0.74

$$\lambda = 10 + 12 \eta e^{-3/T_r} \quad (5.13)$$



- คำนวณจากสมการ
- ข้อมูลการทดลอง ที่สภาวะเหนือวิกฤต

รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์

ในการศึกษา การกราฟต์โคโพลิเมอร์อย่างธรรมชาติ ด้วยเมทิลเมทาคริเลต ที่สภาวะเหนือวิกฤต พบว่าค่าที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ผลคือ ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ (% GE)

เมื่อทำการศึกษามวลของตัวแปรต่างๆซึ่ง ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และเวลา ในการกราฟต์โคโพลิเมอร์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้อย่างแม่นยำหนัก 7.5 กรัม ผ่านคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เคมี ควบคุมให้ได้ตามสภาวะที่กำหนดแล้วทิ้งไว้ให้เกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ โดยกำหนดความดันที่ 40 – 90 บาร์ เลือกทำที่สภาวะเหนือวิกฤต เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการบวมและพองมาก คือ ทำการทดลองที่ความดัน 80 บาร์ จากนั้นแปรค่าอุณหภูมิที่ 35, 45, 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ใช้เวลาในการกราฟต์ อยู่ในช่วง 15 – 120 นาที แล้วจึงนำยางแผ่นไปตรวจวิเคราะห์หา ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ แล้วนำผลการวิเคราะห์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1 อิทธิพลของความดัน ต่อการเพิ่มของปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์

จากรูป 4.3 แสดง ผลของความดันต่อปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ พบว่า เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการกราฟต์ก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยเพิ่มได้มากในช่วง 70 – 90 บาร์

เมื่อพิจารณาถึงผลของความดัน ต่อปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ พบว่า เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น การกราฟต์โคโพลิเมอร์ในแผ่นยาง ที่อุณหภูมิ และเวลาคงที่ จะเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงว่า ปฏิริยาการกราฟต์โคโพลิเมอร์ จะเกิดได้ดีที่ความดันสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องจาก ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งใช้เป็นตัวพาเอาเมทิลเมทาคริเลตเข้าไปในเนื้อยาง จากรูปที่ 2.2 พบว่า เมื่อความดันสูงขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงขึ้นด้วย และทำให้เกิดปฏิริยาในการกราฟต์โคโพลิเมอร์ดีขึ้น คือ เมื่อความหนาแน่นสูง ปริมาตรต่อมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ จะต่ำ โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ใกล้กันมากขึ้นในปริมาตรที่เท่ากัน ดังนั้น โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่แผ่นยางจะมากขึ้นด้วย ทำให้มีโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะพาเมทิลเมทาคริเลต เข้าไปแทรกตัวอยู่ใกล้กับสายของไอโซพรีน ได้มากขึ้น จึงสามารถมีโอกาสเกิดปฏิริยากันได้มากขึ้นด้วย

จากผลการทดลอง ที่ความดัน 40 – 60 บาร์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์จะมีความหนาแน่นต่ำ อยู่ในช่วง 0.0887 – 0.1582 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ที่ความดัน 70 – 90 บาร์ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งเป็นช่วงที่เหนือจุดวิกฤต ความหนาแน่นจะสูงอยู่ในช่วง 0.2343 – 0.6528 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้การกราฟต์โคโพลิเมอร์ของแผ่นยาง โดย



ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เหนือสภาวะวิกฤต จะเกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ได้ดี และมีปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ได้สูงกว่า การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะต่ำกว่าสภาวะวิกฤต

2 อิทธิพลของอุณหภูมิ ต่อการเพิ่มของปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.5 แสดง ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการกราฟต์จะเกิดมากขึ้นด้วย แต่เพิ่มในปริมาณน้อย จนเกือบคงที่

จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะมีผลต่อการเพิ่มปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ เฉพาะในกรณีที่ 15 – 30 นาที เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่งจะเริ่มเข้าไปในเนื้อยาง (กุน้อย) และเป็นตัวพาให้เมทิลเมทาคริเลตเข้าไปด้วย แล้วจึงเกิดปฏิกิริยาขึ้น ตามลำดับ ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ในช่วงนี้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ส่วนเมื่อเวลา 60 – 120 นาที ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง(จากรูปที่ 2.2) ทำให้ปริมาตรต่อมวลของคาร์บอนไดออกไซด์สูง โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ห่างกันในปริมาตรที่เท่ากัน ดังนั้น โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่แผ่นยางจะน้อยลงด้วย จึงทำให้มีคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะพาเมทิลเมทาคริเลตเข้าไปในเนื้อยางน้อยลง จึงเกิดการทำปฏิกิริยาน้อยลง ปริมาณการกราฟต์จึงเพิ่มไม่มากนัก ดังนั้น ที่เวลา 60 – 120 นาที อุณหภูมิจึงไม่มีผลต่อการกราฟต์โคโพลิเมอร์

3 อิทธิพลของเวลา ต่อการเพิ่มของปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์

จากรูป 4.6 แสดง ผลของเวลาต่อปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ พบว่า เมื่อเวลานานขึ้น จะมีปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ไม่มากเท่ากับช่วงแรก แสดงว่า คาร์บอนไดออกไซด์จะพาเมทิลเมทาคริเลตเข้าทำปฏิกิริยากับไอโซพรีนของยาง เพิ่มมากในช่วงแรกแล้วจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลานานขึ้น

จากผลการทดลอง จะพบว่า ปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ต่อมาจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการกราฟต์โคโพลิเมอร์ขึ้นกับ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่แทรกตัวในเนื้อยางบนสายไอโซพรีน เมื่อพิจารณาถึงการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ จากข้อมูลตารางที่ ค 6 ภาคผนวก ค พบว่า การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าสู่แผ่นยางอย่างสูงในช่วง 0 – 60 นาที ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปแทรกตัวอยู่บนสายไอโซพรีนได้มาก ทำให้เมทิลเมทาคริเลตที่ผิวของแผ่นยางแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโพลิไอโซพรีนของยางได้มากด้วย จากนั้นการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย เพราะว่า

โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ จะอยู่ในแผ่นยางจนเกือบเต็มแล้ว ทำให้เกิดการกีดขวางการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์จากภายนอกเข้าสู่แผ่นยาง ซึ่งจะทำให้มีโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่จะเข้าไปแทรกตัวบนสายไอโซพรีนไม่มากขึ้นกว่าช่วง 60 นาทีแรกมากนัก

4 อิทธิพลสัดส่วนของน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อน้ำหนักยางต่อปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์

จากรูป 4.7 แสดง ผลของสัดส่วนระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางกับความดัน พบว่า เมื่อความดันสูงขึ้นทำให้ คาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในยางได้มากขึ้น มีผลให้ยางแผ่นบวมและพองขึ้น สัดส่วนนี้ก็จะมากขึ้นตามความดัน

รูป 4.8 แสดง ผลของสัดส่วนระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง กับอุณหภูมิ พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กรณีเวลา 60 - 120 นาที ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในแผ่นยางไม่ได้เพิ่มมากเท่าไรนัก จนถึงว่าคงที่ เนื่องจากความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่า อุณหภูมิไม่มีผลต่อสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง

รูปที่ 4.9 แสดง ผลของสัดส่วนระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง กับเวลา พบว่า เมื่อเวลานานขึ้น ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่เข้าไปในแผ่นยาง จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0 - 60 นาที ต่อมา ช่วง 60 - 120 นาที คาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในยางได้น้อยลง เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเต็มแผ่นยางแล้วนั่นเอง

รูปที่ 4.10 แสดง ผลของสัดส่วนระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง กับปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ พบว่า เมื่อสัดส่วนของน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางเพิ่มมากขึ้น มีผลให้เกิดการกราฟต์โคโพลิเมอร์ มากขึ้นด้วย เนื่องจาก คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวช่วยพาให้เมทิลเมทาคริเลต เข้าไปทำปฏิกิริยากับโพลีไอโซพรีนมากขึ้น ตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้

จากสมมุติฐานในหัวข้อ 5.2 ที่ใช้อธิบายกลไกของการกราฟต์โคโพลิเมอร์อย่างธรรมชาติด้วยเมทิลเมทาคริเลต ที่สภาวะเหนือวิกฤตนี้ พบว่า เมื่อผ่านคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เคมี คาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าสู่แผ่นยาง ทำให้ยางเกิดการพองตัวขยายใหญ่ขึ้น ลักษณะภายในของเนื้อยางเปลี่ยนไปมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลยางกว้างมากขึ้น ทำให้โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์พาเมทิลเมทาคริเลตแพร่เข้าออกได้ดี โดยโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะแทรกตัวเข้าไปเกาะห้อมล้อมรอบโมเลกุลของสายไอโซพรีน ทำให้เมทิลเมทาคริเลตที่แพร่เข้ามาพร้อมกับคาร์บอนไดออกไซด์ มีโอกาสที่จะเกิดทำปฏิกิริยากับโพลีไอโซพรีนในส่วนที่เป็นพันธะคู่มากขึ้นด้วย จึงมีผลต่อปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์ขึ้น

สมบัติทางฟิสิกส์ของยางผลึกภัณฑ์

รูป 4.11 เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง raw rubber , rubber control (% GE = 10) และ rubber product (% GE = 20) จะพบว่า

- Hardness ค่าความแข็งของ rubber product จะมากกว่า rubber control มาก เนื่องจากเมทิลเมทาคริเลต เข้าทำปฏิกิริยามากขึ้น จึงมีผลทำให้เพิ่มความแข็งให้กับยางมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ กับ raw rubber ก็ได้ผลที่คล้ายกัน
- Tensile strength เป็นค่าแรงที่ใช้ดึงยางจนยางขาดต่อพื้นที่หน้าตัดของยางเดิม
- Elongation at break เป็นค่าความยาวของยางที่สามารถยืดได้จนกระทั่งยางขาด
- 100%, 300%, 500% Modulus เป็นค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่เดิมที่ต้องใช้เพื่อจะยืดยางออกให้ได้เป็นความยาวที่ต้องการ

ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ใช้บอกความยืดหยุ่น หรือทนต่อแรงที่มากกระทำ จะเห็นว่า rubber product จะมีค่าความทนต่อแรงดึง และความยืดหยุ่นน้อยลง เนื่องจากเมทิลเมทาคริเลต ที่เข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยาง จะไปเพิ่มความแข็งให้กับยางและลดความยืดหยุ่นนี้ลง และเมื่อมีปริมาณการกราฟต์มาก ก็จะทำให้มีค่าเหล่านี้ น้อยลง ตามลำดับ

สมบัติทางฟิสิกส์ของยางผลึกภัณฑ์ในกาว

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่า rubber product ที่นำมาทำเป็นกาว แล้ววัดค่า ความหนาแน่น , เปอร์เซ็นต์เนื้อกาว และความต้านแรงเฉือน พบว่าเมื่อนำยางที่มีปริมาณการกราฟต์โคโพลิเมอร์มากขึ้น มาทำกาว จะมีค่าสมบัติในด้านรูปกาวมากขึ้น ตามลำดับ แต่ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับกาวน้ำและกาวลาเท็กซ์ จะพบว่ามีค่าสมบัติทางฟิสิกส์ด้านรูปกาวใกล้เคียงกับกาวลาเท็กซ์ และมากกว่ากาวยางน้ำ