

## บทที่ 2

### กระบวนการผลิตพอลิสไตรีนแบบสารละลายและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการผลิตพอลิสไตรีนแบบใช้ตัวทำละลาย [ 1 ]

##### 2.1.1 ชนิดของผลิตภัณฑ์

กระบวนการผลิตพอลิสไตรีนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ทำการผลิตพอลิสไตรีน 2 ชนิดดังนี้

ก. พอลิสไตรีนชนิดเกรดทั่วไป ( General Purpose Polystyrene, GPPS ) มีลักษณะใส แข็ง และ เปราะ ไม่ทนต่อแรงกระแทก

ข. พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก ( High Impact Polystyrene, HIPS ) มีลักษณะขาวขุ่นและทนต่อแรงกระแทก

##### 2.1.2 สารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพอลิสไตรีน

สารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพอลิสไตรีนมีดังนี้

1) สไตรีนมอนอเมอร์ ( Styrene Monomer ) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เมื่อสไตรีนมอนอเมอร์ได้รับการกระตุ้นจากตัวเริ่มหรือความร้อนก็จะแตกตัวและต่อกันเป็นสายยาว

2) เอทิลเบนซีน ( Ethylbenzene ) ถูกใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีโครงสร้าง และสมบัติทางกายภาพ ใกล้เคียงกับสไตรีนมอนอเมอร์ และเป็นสารเคมีที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เอทิลเบนซีนมีหน้าที่ช่วยกระจายความร้อน และควบคุมอัตราการเปลี่ยนจากสไตรีนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิสไตรีน และยังช่วยในการหยุดปฏิกิริยาเมื่อมีความผิดปกติในกระบวนการผลิต

3) น้ำมันแร่ ( Mineral Oil ) เป็นพลาสติกไซเซอร์ ( plasticizer ) ที่ช่วยในการปรับปรุงสภาพการไหลของพอลิสไตรีนขณะขึ้นรูป ปริมาณการใช้น้ำมันแร่ของพอลิสไตรีนแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์จะไม่เท่ากัน

4) ยางบิวตะไดอิน ( Butadiene Rubber ) ใช้เป็นโคพอลิเมอร์ในการผลิตพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก ยางบิวตะไดอินจะทำให้พอลิสไตรีนมีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงกระแทกได้ดี

5) ซิงค์สเตียเรท ( Zinc Stearate ) จะช่วยปรับปรุงสมบัติในการขึ้นรูปชิ้นงานของพอลิสไตรีนที่ผลิตได้ และช่วยในการแยกชิ้นงานออกจากแบบ

6) บลูดาาย ( Blue Dye ) จะช่วยในการปรับปรุงสีของพอลิสไตรีนชนิดเกรดทั่วไปให้มีสีฟ้าอ่อนๆ

7) ตัวเริ่มปฏิกิริยา ( Initiator, t-butyl-peroxy-2-ethylheanoate ) จะแตกตัวให้อนุมูลอิสระ ( Free radical ) เพื่อทำปฏิกิริยากับสไตรีนมอนอเมอร์

8) สารป้องกันการออกซิไดซ์ ( Antioxidizer ) จะใช้เมื่อผลิตพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก เพื่อช่วยในการป้องกันการทำปฏิกิริยาพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกระหว่างกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งจะทำให้พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกมีสีเหลืองบริเวณผิว

### 2.1.3 กระบวนการผลิตพอลิสไตรีน

กระบวนการผลิตพอลิสไตรีนแสดงได้ดังรูป 2.1 โดยประกอบด้วยหน่วยผลิตต่างๆ ดังนี้

- 1) หน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 1 ( First Stage Pre Polymerization Unit )
- 2) หน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 2 ( Second Stage Pre Polymerization Unit )
- 3) หน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 1 ( First Stage Reactor Polymerization Unit )

- 4) หน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 2 (Second Stage Reactor Polymerization Unit )
- 5) หน่วยกำจัดตัวทำละลายและมอนอเมอร์ที่เหลือ ( Devolatilizer Unit )
- 6) หน่วยทำให้เป็นเม็ด ( Pelletizer Unit )
- 7) หน่วยจัดเก็บและบรรจุถุง ( Storage and Packaging Unit )

รายละเอียดของหน่วยผลิตต่างๆมีดังนี้

#### 1) หน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 1

วัตถุดิบที่ป้อนเข้ากระบวนการผลิตซึ่งประกอบไปด้วย สไตรีนมอนอเมอร์ เอทิลเบนซีน และน้ำมันแร่ จะถูกส่งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าหน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 1 ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ทรงตั้งพร้อมใบกวนที่หน่วยนี้ สไตรีนมอนอเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดเป็นพอลิสไตรีนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก โดยจะควบคุมสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $110^{\circ}\text{C}$  ถึง  $130^{\circ}\text{C}$  และความดันอยู่ในช่วง  $0.5 \text{ กก/ซม.}^2$  ถึง  $0.7 \text{ กก/ซม.}^2$  ที่ด้านบนของถังปฏิกรณ์จะมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอีกหนึ่งชุดเพื่อกำจัดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันออกจากไอของสไตรีนมอนอเมอร์และเอทิลเบนซีน ทำให้ไอของสไตรีนมอนอเมอร์และเอทิลเบนซีนควบแน่นและถูกส่งกลับเข้าถังปฏิกรณ์นี้อีกครั้งในรูปของเหลวกลั่นตัว ( Reflux ) พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น มอนอเมอร์ที่ยังเหลืออยู่ และตัวทำละลายจะถูกส่งออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยปั๊มไปยังหน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 2 เพื่อทำปฏิกิริยาต่อไป

#### 2) หน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 2

พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น สไตรีนมอนอเมอร์ที่ยังเหลืออยู่และตัวทำละลายที่เกิดจากหน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 1 จะถูกส่งเข้าทางด้านบนของหน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 2 ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ทรงตั้งพร้อมใบกวนทางด้านบนที่หน่วยนี้สไตรีนมอนอเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น

เป็นประมาณร้อยละ 32 โดยน้ำหนักถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยจะควบคุมสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $120^{\circ}\text{C}$  ถึง  $140^{\circ}\text{C}$  และความดันอยู่ในช่วง  $0.4 \text{ กก./ซม.}^2$  ถึง  $0.7 \text{ กก./ซม.}^2$  ที่ด้านบนของถังปฏิกรณ์จะมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอีกหนึ่งชุดเพื่อกำจัดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันออกจากไอของสไตรีนมอนอเมอร์ และเอทิลเบนซีน ทำให้ไอของสไตรีนมอนอเมอร์และเอทิลเบนซีนควบแน่นและถูกส่งกลับเข้าถังปฏิกรณ์นี้อีกครั้งในรูปของของเหลวกลั่นตัว ( Reflux ) พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น สไตรีนมอนอเมอร์ที่ยังเหลืออยู่ และตัวทำละลายจะถูกส่งออกจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยปั๊มไปยังหน่วยพอลิเมอไรเซชัน หน่วยที่ 1 เพื่อทำปฏิกิริยาต่อไป

### 3) หน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 1

พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น สไตรีนมอนอเมอร์ที่ยังเหลืออยู่ และตัวทำละลายจากหน่วยพอลิเมอไรเซชันขั้นต้นหน่วยที่ 2 จะถูกส่งเข้าหน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 1 ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ทรงนอนพร้อมใบกวน และมีท่อน้ำมันร้อนติดตั้งอยู่ภายใน ที่หน่วยนี้ สไตรีนมอนอเมอร์ จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักถึงร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก โดยจะควบคุมสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $150^{\circ}\text{C}$  ถึง  $160^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นจะถูกส่งออกจากด้านบนของถังปฏิกรณ์ไปยังหน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 2 เพื่อทำปฏิกิริยาต่อไป

### 4) หน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 2

พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น สไตรีนมอนอเมอร์ที่ยังเหลืออยู่ และตัวทำละลายจากหน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 1 จะถูกส่งเข้าหน่วยพอลิเมอไรเซชันหน่วยที่ 2 ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ทรงนอนพร้อมใบกวน และมีท่อน้ำมันร้อนติดตั้งอยู่ภายใน ที่หน่วยนี้ สไตรีนมอนอเมอร์ จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นเป็นประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก โดยจะควบคุมสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ให้มี อุณหภูมิอยู่ในช่วง  $160^{\circ}\text{C}$  ถึง  $170^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะถูกส่งออกจากด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยปั๊มไปยังหน่วยกำจัดตัวทำละลายและมอนอเมอร์ที่เหลือต่อไป

#### 5) หน่วยกำจัดตัวทำละลายและสไตรีนมอนอเมอร์ที่เหลือ

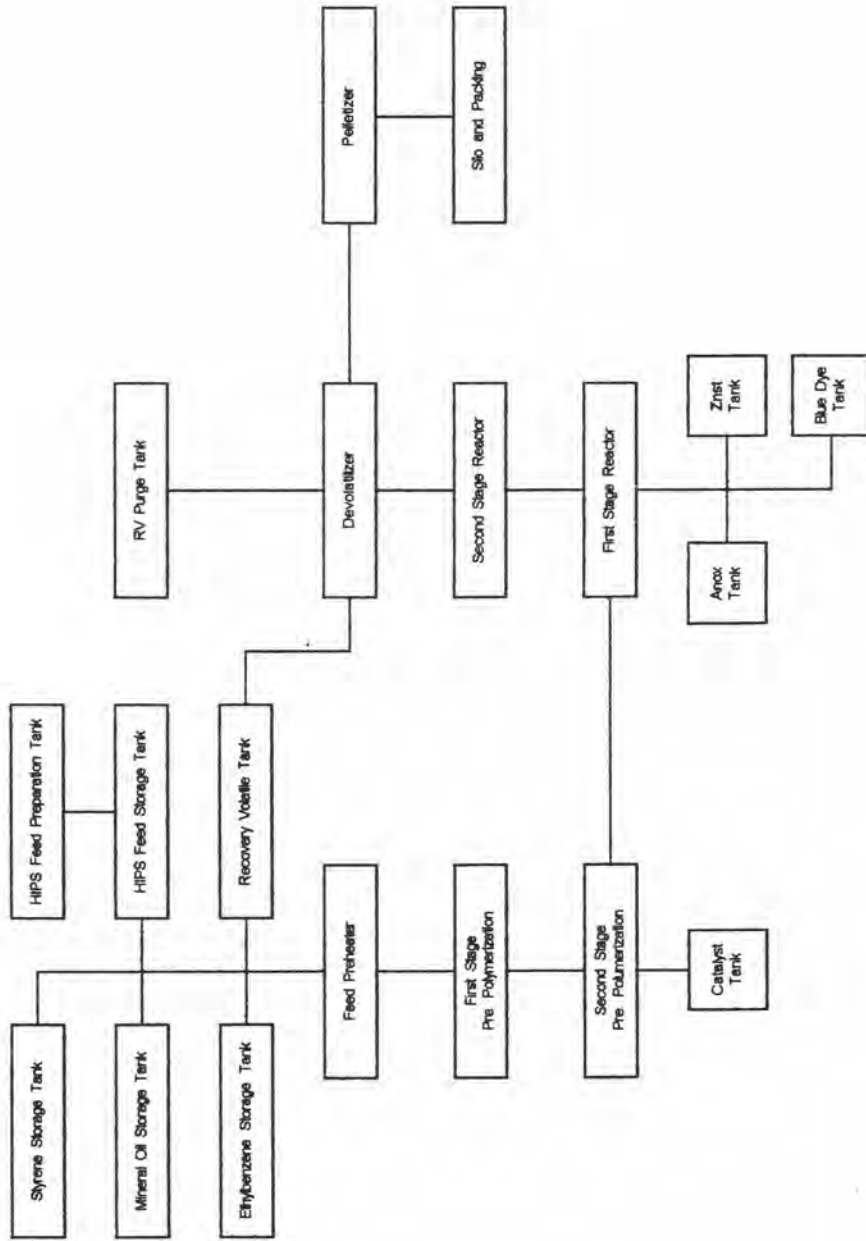
พอลิเมอร์ ตัวทำละลาย และสไตรีนมอนอเมอร์ ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในหน่วยพอลิเมอร์ไรเซชันหน่วยที่ 2 จะถูกส่งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 243 °ซ เพื่อให้เพียงพอต่อความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของตัวทำละลายและมอนอเมอร์ จากนั้นพอลิเมอร์ ตัวทำละลาย และมอนอเมอร์ที่ได้รับความร้อนจะถูกผ่านลงมาในถังที่มีความดันต่ำมาก ตัวทำละลายและมอนอเมอร์จะระเหยกลายเป็นไอ และจะถูกบีบด้วยปั๊มสุญญากาศส่งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอีกชุดหนึ่งเพื่อควบแน่นให้เป็นของเหลว และนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต ส่วนพอลิสไตรีนจะตกลงสู่ด้านล่างของถังและถูกส่งไปยังหน่วยทำให้เป็นเม็ดต่อไป

#### 6) หน่วยทำให้เป็นเม็ด

พอลิสไตรีนจากหน่วยกำจัดตัวทำละลายและสไตรีนมอนอเมอร์ที่เหลือจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้เป็นเส้นและผ่านลงในน้ำ ในระหว่างนี้จะมีใบมีดตัดเส้นพอลิสไตรีนให้เป็นเม็ด น้ำจะช่วยทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวอุณหภูมิตกลงและช่วยขนส่งเม็ดพอลิเมอร์ไปยังอุปกรณ์ที่แยกน้ำกับพอลิเมอร์ และอุปกรณ์คัดขนาด จากนั้นจะถูกส่งไปยังหน่วยจัดเก็บและบรรจุถุงต่อไป

#### 7) หน่วยจัดเก็บและบรรจุถุง

เม็ดพลาสติกที่ออกจากหน่วยทำให้เป็นเม็ด จะถูกส่งด้วยระบบขนส่งด้วยลมไปเก็บในถังไซโล เมื่อจะบรรจุถุงก็จะถูกส่งด้วยระบบขนส่งด้วยลมไปยังเครื่องบรรจุถุงเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปจะบรรจุถุงขนาดบรรจุ 25 กิโลกรัมต่อถุง



รูป 2.1 กระบวนการผลิตพอลิไทรีนที่ใช้ทำการทดลอง

## 2.2 กลไกของพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ [ 2 ]

2.2.1 ปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดผลิตภัณฑ์เกิดผ่านสารตัวกลาง ( Intermediate ) ซึ่งสารตัวกลางจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคี่เรียกว่าอนุมูลอิสระ ( Free Radical )

2.2.2 กลไกของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระนั้น ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นเริ่มต้น ขั้นแผ่ขยาย และขั้นสิ้นสุด

2.2.3 ขั้นเริ่มต้น (initiation) เมื่ออนุมูลอิสระเกิดขึ้นในที่ที่มีมอนอเมอร์ประเภทไม่อิ่มตัวเช่น สไตรีนมอนอเมอร์ อนุมูลอิสระจะรวมเข้าไปที่พันธะคู่และเกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้นมาอีกเรียกว่ามีจุดว่องไวเกิดขึ้น ถ้าให้ I เป็นตัวเริ่มและให้ R เป็นอนุมูลอิสระ ที่เกิดจากตัวเริ่ม



จากนั้น  $R^{\cdot}$  จะรวมตัวกับมอนอเมอร์โมเลกุลแรก ซึ่งมีโอกาสเกิดได้ 2 ลักษณะ

ดังนี้



หรือ



โอกาสที่จะเกิดแบบใดมากกว่ากันขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาทั้งสอง การเกิดการรวมตัวของอนุมูลอิสระเข้าไปยังโมเลกุลของมอนอเมอร์ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีอะตอมของตัวเริ่มต้นอยู่ด้วยและไม่สามารถแยกออกไปได้ นอกจากนี้การรวมตัวของอนุมูลอิสระเข้าไปยังโมเลกุลของมอนอเมอร์นั้นจะรวมตัวกันเข้าไปหมดทุกอนุมูลอิสระหรือไม่นั้นสามารถวัดออกมาเป็นประสิทธิภาพของตัวเริ่ม โดยเปรียบเทียบจำนวนอนุมูลอิสระที่เกิดโดยการสลายตัวของตัวเริ่มกับจำนวนโมเลกุลของพอลิเมอร์

ขั้นแผ่ขยาย (propagation) ขั้นนี้จะเกิดขึ้นหลังจากที่มอนอเมอร์โมเลกุลแรกรวมตัวกับอนุมูลอิสระ ขั้นแผ่ขยายจะเริ่มจากมอนอเมอร์โมเลกุลที่สองรวมตัวเข้ากับจุดที่ว่างไว้ ถ้า  $M_1$  เป็นมอนอเมอร์โมเลกุลแรกขณะที่เกิด  $RM_1^\cdot$  เพราะฉะนั้น  $M$  ตัวต่อไปจะรวมตัวเข้าไปที่จุดว่างไว้ แล้วจุดว่างไว้จะย้ายจาก  $M_1$  ไปที่  $M$  ตัวต่อไปเรื่อย ๆ



$M_2$  หมายถึงมีมอนอเมอร์ 2 หน่วย



$M_3$  หมายถึงมีมอนอเมอร์ 3 หน่วย

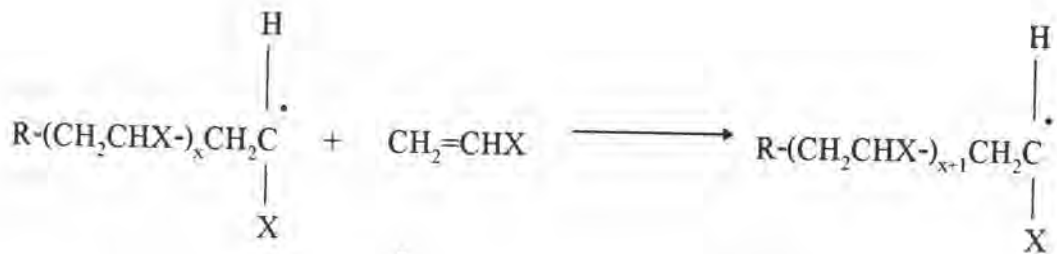
จนกระทั่ง



$M_{x+1}$  หมายถึงมีมอนอเมอร์  $x+1$  หน่วย

เขียนสูตรเต็มจะเป็น





ขั้นสิ้นสุด (termination) หลังจากขั้นแผ่ขยายเกิดขึ้นได้เรื่อย ๆ จนกระทั่งมีจำนวนมอนอเมอร์น้อยลงทำให้โอกาสที่อนุมูลอิสระที่ปลายสายโซ่โมเลกุลจะรวมตัวกับมอนอเมอร์น้อยลง แนวโน้มของอนุมูลอิสระที่ปลายสายโซ่ของแต่ละสายโซ่โมเลกุลจะมารวมกันหรือทำให้เกิดอิเล็กตรอนคู่มีมากขึ้น ทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์และจุดว่างไวจะสูญเสียไป ทำให้สายโซ่โมเลกุลหยุดเติบโตต่อไปเรียกว่าขั้นสิ้นสุด ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

ก. การรวมกันหรือการจับคู่ (combination or coupling) ลักษณะนี้จะเกิดเมื่อสายโซ่โมเลกุลที่กำลังแผ่ขยาย 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกัน เป็น 1 สายโซ่โมเลกุล



ข. เกิดการโยกย้ายของอะตอมไฮโดรเจนจากสายโซ่โมเลกุลหนึ่งไปอีกสายโซ่โมเลกุลหนึ่งเรียกว่าการแยกส่วน (disproportionation)



สำหรับพอลิสไตรีนมักเกิดขั้นสิ้นสุดแบบการจับคู่

### 2.3 การคำนวณสมบัติทางกายภาพ [3]

#### 2.3.1 การคำนวณค่าสัดส่วนโมล

กำหนดให้

% RB = ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของยางบิวตะไคอินที่ไหลเข้าหน่วยผลิต

% EB = ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของเอทิลเบนซีนที่ไหลเข้าหน่วยผลิต

% MO = ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันแร่ที่ไหลเข้าหน่วยผลิต

% Conversion = ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของการเปลี่ยนจากสไตรีนมอนอเมอร์

เป็นพอลิสไตรีน

$X_{RB}$  = ค่าสัดส่วน โมลของยางบิวตะไคอิน

$X_{EB}$  = ค่าสัดส่วน โมลของเอทิลเบนซีน

$X_{MO}$  = ค่าสัดส่วน โมลของน้ำมันแร่

$X_{PS}$  = ค่าสัดส่วน โมลของพอลิสไตรีน

$X_{SM}$  = ค่าสัดส่วน โมลของสไตรีนมอนอเมอร์

ค่าสัดส่วนโมลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$X_{RB} = \% RB / 100$$

$$X_{EB} = \% EB / 100$$

$$X_{MO} = \% MO / 100$$

$$X_{PS} = \% Conversion ( 1 - X_{RB} - X_{EB} - X_{MO} ) / 100$$

$$X_{SM} = 1 - X_{RB} - X_{EB} - X_{MO} - X_{PS}$$

#### 2.3.2 การคำนวณค่าความหนาแน่น

กำหนดให้

T = อุณหภูมิ (°ซ)

$\rho_{SM}$  = ความหนาแน่นของสไตรีนมอนอเมอร์ ( กิโลกรัม\*ลูกบาศก์เมตร<sup>-1</sup> )

$\rho_{RB}$  = ความหนาแน่นของยางบิวตะไคอิน ( กิโลกรัม\*ลูกบาศก์เมตร<sup>-1</sup> )

$\rho_{EB}$  = ความหนาแน่นของเอทิลเบนซีน ( กิโลกรัม\*ลูกบาศก์เมตร<sup>-1</sup> )

- $\rho_{MO}$  = ความหนาแน่นของน้ำมันแร่ ( กิโลกรัม\*ลูกบาศก์เมตร<sup>-1</sup> )  
 $\rho_{PS}$  = ความหนาแน่นของพอลิสไตรีน ( กิโลกรัม\*ลูกบาศก์เมตร<sup>-1</sup> )  
 $\rho_{TOT}$  = ความหนาแน่นของของผสม ( กิโลกรัม\*ลูกบาศก์เมตร<sup>-1</sup> )

ค่าความหนาแน่นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho_{SM} &= 931.2 - 0.98 * T \\ \rho_{RB} &= 915.6 - 0.78 * T \\ \rho_{EB} &= 879.98 - 0.74189 * T - 0.001095 * T^2 \\ \rho_{MO} &= 853.6 - 0.64364 * T \\ \rho_{PS} &= 1052.7 - 0.246 * T \text{ ในกรณีที่ } T \leq 101 \text{ }^{\circ}\text{ซ} \\ &= 1094.9 - 0.565 * T \text{ ในกรณีที่ } 101 \text{ }^{\circ}\text{ซ} < T \leq 162.8 \text{ }^{\circ}\text{ซ} \\ &= 1106.2 - 0.665 * T \text{ ในกรณีที่ } T > 162.8 \text{ }^{\circ}\text{ซ} \\ \rho_{tot} &= 1 / ( X_{SM} / \rho_{SM} + X_{RB} / \rho_{RB} + X_{EB} / \rho_{EB} + X_{MO} / \rho_{MO} + X_{PS} / \rho_{PS} ) \end{aligned}$$

### 2.3.3 การคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ

กำหนดให้

$sp.ht._{SM}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของสไตรีนมอนอเมอร์ ( กิโลคาลอรี\*กิโลกรัม<sup>-1</sup>\*  
<sup>๐ซ<sup>-1</sup></sup> )

$sp.ht._{PS}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของพอลิสไตรีน ( กิโลคาลอรี\*กิโลกรัม<sup>-1</sup>\*<sup>๐ซ<sup>-1</sup></sup> )

$sp.ht._{RB}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของยางบิวตะไดอิน ( กิโลคาลอรี\*กิโลกรัม<sup>-1</sup>\*<sup>๐ซ<sup>-1</sup></sup> )

$sp.ht._{EB}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของเอทิลเบนซีน ( กิโลคาลอรี\*กิโลกรัม<sup>-1</sup>\*<sup>๐ซ<sup>-1</sup></sup> )

$sp.ht._{MO}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมันแร่ ( กิโลคาลอรี\*กิโลกรัม<sup>-1</sup>\*<sup>๐ซ<sup>-1</sup></sup> )

$sp.ht._{tot}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของของผสม ( กิโลคาลอรี\*กิโลกรัม<sup>-1</sup>\*<sup>๐ซ<sup>-1</sup></sup> )

ค่าความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$sp.ht._{SM} = 0.39474 + 3.18315 * 10^{-4} * T + 4.90849 * 10^{-6} * T^2$$

กรณี (  $T \leq 101$  °ซ )

$$\text{sp.ht.}_{\text{PS}} = 0.177484 + 8.2513 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1.008 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1.7858 \cdot 10^{-7} \cdot T^3$$

กรณี (  $T > 101$  °ซ )

$$\text{sp.ht.}_{\text{PS}} = 0.77042 - 0.009245 \cdot T + 8.5854 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 3.018 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 3.6573 \cdot 10^{-10} \cdot T^4$$

$$\text{sp.ht.}_{\text{RB}} = 0.449 + 0.0007 \cdot T$$

$$\text{sp.ht.}_{\text{EB}} = 0.400666 + 3.17592 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.24993 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$

$$\text{sp.ht.}_{\text{MO}} = 0.465 + 0.00083 \cdot T$$

$$\text{sp.ht.}_{\text{TOT}} = X_{\text{SM}} \cdot \text{sp.ht.}_{\text{SM}} + X_{\text{PS}} \cdot \text{sp.ht.}_{\text{PS}} + X_{\text{RB}} \cdot \text{sp.ht.}_{\text{RB}} + X_{\text{EB}} \cdot \text{sp.ht.}_{\text{EB}} + X_{\text{MO}} \cdot \text{sp.ht.}_{\text{MO}}$$

### 2.3.4. การคำนวณหาเอนทาลปี ( Enthalpy )

กำหนดให้

$H_{\text{SM}}$  = ค่าเอนทาลปีของสไตรีนมอนอเมอร์ ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

$H_{\text{PS}}$  = ค่าเอนทาลปีของพอลิสไตรีน ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

$H_{\text{RB}}$  = ค่าเอนทาลปีของยางบิวตะไคอิน ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

$H_{\text{EB}}$  = ค่าเอนทาลปีของเอทิลเบนซีน ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

$H_{\text{MO}}$  = ค่าเอนทาลปีของน้ำมันแร่ ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

$H_{\text{tot}}$  = ค่าเอนทาลปีของของผสม ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

ค่าเอนทาลปีสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H_{\text{SM}} = 0.39474 \cdot T + ( 3.18315 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 ) / 2 + ( 4.90849 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 ) / 3$$

กรณี  $T \leq 101$  °ซ

$$H_{\text{PS}} = 0.27484 \cdot T + ( 8.2513 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 ) / 2 - ( 1.008 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 ) / 3 + ( 1.7858 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 ) / 4$$

กรณี  $T > 101$  °ซ

$$H_{\text{PS}} = 0.77042 \cdot T - ( 0.009245 \cdot T^2 ) / 2 + ( 8.5854 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 ) / 3 - ( 3.018 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 ) / 4 + ( 3.6573 \cdot 10^{-10} \cdot T^5 ) / 5$$

$$H_{\text{RB}} = 0.449 \cdot T + ( 0.0007 \cdot T^2 ) / 2$$

$$H_{EB} = 0.400666 * T + (3.17592 * 10^{-4} * T^2) / 2 + (1.24993 * 10^{-6} * T^3) / 3$$

$$H_{MO} = 0.465 * T + (0.00083 * T^2) / 2$$

$$H_{TOT} = X_{SM} * H_{SM} + X_{PS} * H_{PS} + X_{RB} * H_{RB} + X_{EB} * H_{EB} + X_{MO} * H_{MO}$$

### 2.3.5 การคำนวณหาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

กำหนดให้

$$k_{pSM} = \text{ค่าการนำความร้อนของสไตรีนมอนอเมอร์ (กิโลคาลอรี*เมตร^{-1}*ชั่วโมง^{-1} * ^{\circ}\text{ซ}^{-1})}$$

$$k_{pPS} = \text{ค่าการนำความร้อนของพอลิสไตรีน (กิโลคาลอรี*เมตร^{-1}*ชั่วโมง^{-1} * ^{\circ}\text{ซ}^{-1})}$$

$$k_{pRB} = \text{ค่าการนำความร้อนของยางบิวตะไดอิน (กิโลคาลอรี*เมตร^{-1}*ชั่วโมง^{-1} * ^{\circ}\text{ซ}^{-1})}$$

$$k_{pEB} = \text{ค่าการนำความร้อนของเอทิลเบนซีน (กิโลคาลอรี*เมตร^{-1}*ชั่วโมง^{-1} * ^{\circ}\text{ซ}^{-1})}$$

$$k_{pMO} = \text{ค่าการนำความร้อนของน้ำมันแร่ (กิโลคาลอรี*เมตร^{-1}*ชั่วโมง^{-1} * ^{\circ}\text{ซ}^{-1})}$$

$$k_{pTOT} = \text{ค่าการนำความร้อนของของผสม (กิโลคาลอรี*เมตร^{-1}*ชั่วโมง^{-1} * ^{\circ}\text{ซ}^{-1})}$$

ค่าการนำความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$k_{pSM} = 0.131681 - 6.40132 * 10^{-4} * T + 7.59751 * 10^{-7} * T^2$$

$$k_{pPS} = 0.10548 + 1.8612 * 10^{-4} * (T - 80)$$

$$k_{pRB} = 0.126$$

$$k_{pEB} = 0.1194242 - 2.53123 * 10^{-4} * T - 4.770763 * 10^{-8} * T^2$$

$$k_{pMO} = 0.10548 + 1.8612 * 10^{-4} * (T - 80)$$

$$k_{pTOT} = X_{SM} * k_{pSM} + X_{PS} * k_{pPS} + X_{RB} * k_{pRB} + X_{EB} * k_{pEB} + X_{MO} * k_{pMO}$$

### 2.3.6 การคำนวณหาค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent Heat of Vaporization)

กำหนดให้

$l_{vSM}$  = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสไตรีนมอนอเมอร์ ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

$l_{vEB}$  = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเอทิล ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

$l_{vTOT}$  = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารละลาย ( กิโลคาลอรี \* กิโลกรัม<sup>-1</sup> )

ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$l_{vSM} = 55.84 + 0.133(363.7 - T)$$

$$l_{vEB} = 51.2 + 0.1417(346.4 - T)$$

$$l_{vTOT} = X_{SM} * l_{vSM} + X_{EB} * l_{vEB}$$

2.3.7 การคำนวณหาค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา ( Heat of reaction )

กำหนดให้

$$Q = \text{ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา ( กิโลคาลอรี * กิโลกรัม<sup>-1</sup> )}$$

ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q = 138.9 + 14.575 * \log T$$