

กระบวนการที่ใช้ทำการทดลองและการออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ควบคุม

กล่าวนำ

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่ากระบวนการที่ใช้ผลิตกาวยูธสาหกรรมเลเท็กซ์, สีและสารประเภทใช้เคลือบนั้นเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันและ/หรือแบบแขวนลอยของไวนิลอะซีเตต โมโนเมอร์ (Vinyl acetate monomer) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีพฤติกรรมที่คุณสมบัติของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์แปรผันตามเวลาการดำเนินการผลิต และการดำเนินการผลิตส่วนมากเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Operation) เนื่องจากอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติสุดท้ายของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้ ดังนั้นจึงต้องการตัวควบคุมมาควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ในการดำเนินการผลิตเพื่อความสม่ำเสมอในคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้ การควบคุมที่ต้องอาศัยแบบจำลองของกระบวนการชนิดหนึ่งที่สามารถกำหนดผลการตอบสนองที่ดีเหนือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเททและพารามิเตอร์คือ การควบคุมแบบเจเนริกโมเดล ซึ่งสามารถใช้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นแทรกเข้าไปในอัลกอริทึมของตัวควบคุมนี้ได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำให้เป็นเชิงเส้นก่อนจึงถือได้ว่าการควบคุมแบบเจเนริกโมเดลเป็นการควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่ง และได้กล่าวนำไปก่อนหน้านี้นี้แล้วว่า การที่จะควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์จำเป็นที่จะต้องใช้ตัวควบคุมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นในตัวของมัน

ในงานนี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์แบบแขวนลอยและ/หรือแบบอิมัลชัน และตัวควบคุมที่เลือกมาใช้ในการควบคุมคือ การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลหรือตัวควบคุมจีเอ็มซี ดังนั้นในบทนี้จึงเป็นการอธิบายรายละเอียดของกระบวนการที่ใช้ศึกษาทดลองและการสร้างแบบจำลองของกระบวนการรวมไปถึงการประยุกต์การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลมาใช้ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นี้ด้วย

5.1 รายละเอียดของกระบวนการที่ใช้ศึกษาทดลอง

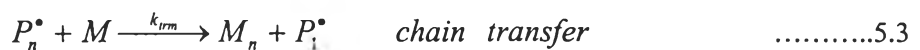
เครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์เป็นเครื่องปฏิกรณ์จำเพาะที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์กาวยูธสาหกรรม ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ที่มีความร้อนคายออกมาจากปฏิกิริยาจำนวนมาก ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการโดยทั่วไปมี ดังนี้คือ

1. เริ่มต้นจากการซาร์จน้ำและของแข็ง (PVA) ลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง
2. ให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์ให้ถึงอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ที่ปฏิกิริยาต้องการ
3. เริ่มป้อนสายป้อนที่ประกอบด้วย โมโนเมอร์, ตัวเริ่ม, น้ำที่ใช้ละลายตัวเริ่ม ลงในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตรา และเป็นระยะเวลาที่ออกแบบไว้ และในขั้นตอนนี้ต้องทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ที่ต้องการ
4. รักษาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่อยู่ที่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ต่อเป็นระยะเวลาที่ออกแบบไว้ หลังจากที่ครบคาบของการป้อนสายป้อน เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

5.2 การสร้างแบบจำลองของกระบวนการ

5.2-1 กฎอัตราและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่มีการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน คือขั้นเริ่มต้น (Initiation), ขั้นแผ่ขยาย (Propagation) และขั้นสิ้นสุด (Termination) รวมถึงมีการถ่ายเทสายโซ่ (Chain Transfer) ไปที่โมโนเมอร์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ ดังนี้



แต่การหาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบแวนอลอย และ/หรือแบบอิมัลชันของไวนิลอะซีเตต โมโนเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์ให้แน่นอนถูกต้องนั้นสามารถทำได้ยากดังนั้นจึงต้อง สมมติให้

1. กฎอัตราของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นถูกประมาณขึ้นที่สภาวะคงตัว (Quasi-Steady-State approximate'QSSA)
2. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแต่ละขั้นตอนเป็นปฏิกิริยาอิลิเมนทารี และไม่สามารถผันกลับได้ (Elementary and Irreversible Reaction)
3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่ละขั้นไม่ขึ้นกับความยาวสายโซ่โพลิเมอร์ (Live Polymer Chain Length)
4. อัตราของปฏิกิริยาการถ่ายเทสายโซ่ไปที่ตัวทำละลายไม่นำมาคิดเมื่อถูกเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาอื่นๆ
5. ไม่คำนึงถึงผลกระทบจากการเจล (gel effect)

จากสมมติที่กล่าวมานี้สามารถหาอัตราการสลายตัวของไวนิลอะซิเตตโมโนเมอร์ได้ถูกกล่าวไว้แล้วใน Teymour และ Rey (1989a) ดังนี้

$$R_M = -R_p = -(k_{pr} + k_{trm})C_M P \quad \dots\dots\dots 5.5$$

$$R_I = k_d C_I \quad \dots\dots\dots 5.6$$

เมื่อ C_M = ความเข้มข้นของโมโนเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลโมล/ลูกบาศก์เมตร)

P = ความเข้มข้นของโพลิเมอร์ (กิโลโมล/ลูกบาศก์เมตร)

C_I = ความเข้มข้นของตัวเริ่มต้น (กิโลโมล/ลูกบาศก์เมตร)

โดยที่

$$P = \left[\frac{2fk_d C_I}{k_t} \right]^{0.5} \quad \dots\dots\dots 5.7$$

$$\frac{k_{pr}}{k_{tro}} = Z_{pro} \exp\left(\frac{-E_{pro}}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots 5.8$$

$$k_{tro} = Z_{tro} \exp\left(\frac{-E_{tro}}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots 5.9$$

$$k_d = Z_d \exp\left(\frac{-E_d}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots 5.10$$

$$k_{irm} = Z_{irm} \exp\left(\frac{-E_{irm}}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots 5.11$$

ค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าที่ได้นำมาใช้ นำมาจากรายงานของ Teymour และ Rey (1989a) ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 5.1

5.1-2. ไคนามิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์

เนื่องจากปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในคาบของการดำเนินการ ดังนั้นการทำความเข้าใจในทอมของความเข้มข้นจึงเป็นการไม่สะดวก จึงเป็นการง่ายกว่าถ้าทำความเข้าใจในทอมของมวล โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. อุณหภูมิของส่วนผสมของปฏิกิริยาเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้
2. ที่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของปฏิกิริยาไม่มีการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง
3. รอบการกวนที่ใช้สามารถทำให้การผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของไวนิลอะซีเตต โมโนเมอร์

สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
Z_{iro}	$m^3 \cdot kmol^{-1} \cdot min^{-1}$	$2.03e + 10$
E_{iro}	$kJ \cdot kmol^{-1}$	2944.2
Z_{pro}	$m^3 \cdot kmol^{-1} \cdot min^{-1}$	$2.9394e + 2$
E_{pro}	$kJ \cdot kmol^{-1}$	4869
Z_d	$m^3 \cdot kmol^{-1} \cdot min^{-1}$	$1.58e + 2$
E_d	$kJ \cdot kmol^{-1}$	30800
Z_{irm}	$m^3 \cdot kmol^{-1} \cdot min^{-1}$	0.852
E_{irm}	$kJ \cdot kmol^{-1}$	2700
R	$kJ \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$	8.314
$-\Delta H$	$kcal \cdot kmol^{-1}$	1010000
f	-	0.8

ดังนั้นสมการดุลมวลขององค์ประกอบ โมโนเมอร์, ตัวเริ่ม, น้ำ และพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของมวลดังนี้ :

สมการดุลมวล :

$$\frac{dm_M}{dt} = f_M w - V[MW_M]R_p \quad \dots\dots\dots 5.12$$

$$\frac{dm_I}{dt} = f_I w - V[MW_I]R_d \quad \dots\dots\dots 5.13$$

$$\frac{dm_w}{dt} = f_w w \quad \dots\dots\dots 5.14$$

$$\frac{dm_p}{dt} = V[MW_M]R_p \quad \dots\dots\dots 5.15$$

$$\frac{dN_{mad}}{dt} = \frac{w}{[MW_M]} f_M \quad \dots\dots\dots 5.16$$

เมื่อ m_M, m_I, m_w, m_p = มวลของ โมโนเมอร์, ตัวเริ่ม, น้ำ และพอลิเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลกรัม)

f_M, f_I, f_w = สัดส่วนมวลของ โมโนเมอร์, ตัวเริ่ม และพอลิเมอร์ในสารที่ถูกป้อน

w = อัตราการป้อนสารตั้งต้น (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

$[MW_M], [MW_I]$ = มวลโมเลกุลของ โมโนเมอร์ และของตัวเริ่ม (กิโลกรัมต่อกิโลโมล)

V = ปริมาตรของส่วนผสมของปฏิกิริยา (ลูกบาศก์เมตร)

N_{mad} = จำนวนโมลของ โมโนเมอร์ทั้งหมดที่ถูกป้อนลงเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลโมล)

โดยที่กำหนดให้

$$V(t) = \frac{m_M(t)}{\rho_M} + \frac{m_I(t)}{\rho_I} + \frac{m_p(t)}{\rho_p} + \frac{m_w(t)}{\rho_w} + \frac{m_{PVA}(t=0)}{\rho_{PVA}} \quad \dots\dots\dots 5.17$$

เมื่อ $\rho_M, \rho_I, \rho_p, \rho_w, \rho_{PVA}$ = ความหนาแน่นของ โมโนเมอร์, ตัวเริ่ม, พอลิเมอร์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

$m_{PVA}(t=0)$ = มวลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เวลาเริ่มต้น (กิโลกรัม)

สมการดุลความร้อนรอบเครื่องปฏิกรณ์ :

$$W_r C_{p_r} \frac{dT}{dt} = w C_{p_{feed}} (T_{feed} - T) + Q_r + UA(T_j - T) \quad \dots\dots\dots 5.18$$

เมื่อ W_r = มวลของส่วนผสมในเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลกรัม)

$C_{p_r}, C_{p_{feed}}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของส่วนผสมในเครื่องปฏิกรณ์และสารที่ป้อน (กิโลแคลอรี.กิโลกรัม⁻¹.องศาเซลเซียส⁻¹)

T, T_{feed}, T_j = อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์, สารที่ป้อนและแจ็กเก็ต (องศาเซลเซียส)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (กิโลแคลอรี.ตารางฟุต⁻¹.ชั่วโมง⁻¹.องศาเซลเซียส)

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (ตารางเมตร)

Q_r = ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (กิโลแคลอรีต่อชั่วโมง)

r = รัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)

โดยที่ สี่เทอมที่อยู่ทางขวามือเป็นปริมาณความร้อนของสารผสมที่ป้อนเข้า, ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาและ ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านแจ็กเก็ต และเทอมความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาสามารถหาได้จาก

$$Q_r(t) = -\Delta H \cdot R_p(t) \quad \dots\dots\dots 5.19$$

เนื่องจากในระหว่างการดำเนินการผลิตมีการเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ของสารที่ไม่สามารถระเหยจากส่วนผสมของปฏิกิริยา (%Fraction Solid หรือ %Non-Volatil) เพื่อติดตามความก้าวหน้าของปฏิกิริยา

โดยที่ค่าสัดส่วนของของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ทุกเวลาในเครื่องปฏิกรณ์สามารถหาได้ดังนี้

$$nv(t) = \frac{m_p + m_{PVA}}{W_r(t)} \quad \dots\dots\dots 5.20$$

และคอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์สามารถหาได้โดยเปรียบเทียบกับจำนวน โมลของ โมโนเมอร์ที่ป้อนทั้งหมด

$$X(t) = \frac{N_{mad}(t) - N_M}{N_{mtotal}} \quad \dots\dots\dots 5.21$$

เมื่อ $N_M = \frac{m_M}{[MW_M]}$ = จำนวนโมลของโมโนเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลโมล)

N_{mtotal} = จำนวนโมลของโมโนเมอร์ทั้งหมดที่ถูกป้อนลงเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลโมล)

X = คอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์โดยหาเทียบกับจำนวนโมลของโมโนเมอร์ที่ใช้ทั้งหมด

เป็นที่รู้กันดีแล้วว่าจลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์มีผลของการเกิดเงรหว่างที่มีข้อจำกัดของการแพร่ที่ความหนืดสูงๆ และคอนเวอร์ชันสูงๆ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อคอนเวอร์ชันเพิ่มขึ้น สำหรับปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของไวนิลอะซีเตดโมโนเมอร์นั้น F.Teymour and W.H. Ray ได้กำหนดค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุดให้เพิ่มขึ้นตามคอนเวอร์ชันดังนี้

$$\frac{k_t}{k_{t0}} = \exp(-0.4407 X - 6.7530 X^2 - 0.3495 X^3) \quad \dots\dots\dots 5.22$$

และในการจำลองครั้งนี้ กระทบได้กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อนรวมลดลงเป็นสมการฟังก์ชันของคอนเวอร์ชันดังนี้

$$U = U_0 * [1 - 0.688 \exp(1 - (1 / X))] \quad \dots\dots\dots 5.23$$

สมการดุลพลังงานของรอบแฉีกเกิด :

ภายใต้สมมติฐานว่าอุณหภูมิของเหลวในแฉีกเกิดมีค่าเดียวกันหมดและไม่ต้องใช้เวลาในการบรรจุแฉีกเกิดเมื่อเปลี่ยนจากไอน้ำเป็นน้ำเย็น เนื่องจากปั๊มที่ทำหน้าที่วนน้ำมีความจุสูงมากทำให้น้ำคูลลิ่งทั้งเข้าและออกมีอุณหภูมิเท่ากันและค่าความจุความร้อนของน้ำคูลลิ่งมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานของแฉีกเกิดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dT_J}{dt} = \frac{\dot{m}_J Cp_J (T_J^{sp} - T_J) - UA(T_J - T)}{m_J Cp_J} \quad \dots\dots\dots 5.24$$

เมื่อ T_j = อุณหภูมิของของไหลในแจ็กเก็ต (องศาเซลเซียส)
 T_{j}^{sp} = อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของแจ็กเก็ต (องศาเซลเซียส)
 \dot{m}_j = อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลเข้าแจ็กเก็ต (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
 m_j = มวลของของไหลในแจ็กเก็ต (กิโลกรัม)
 Cp_j = ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลในแจ็กเก็ต (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส)

โดยที่อุณหภูมิของน้ำในแจ็กเก็ตอยู่ระหว่าง 20 ถึง 120 องศาฟาเรนไฮต์ ($20^\circ C \leq T_{j,sp} \leq 120^\circ C$)

นอกจากนี้พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (A) ของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากปริมาตรของส่วนผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าให้สมมุติว่าเครื่องปฏิกรณ์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก จึงสามารถหาปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ได้ดังนี้

$$A = \frac{2V}{r} \quad \dots\dots\dots 5.25$$

ตั้งแต่สมการที่ 5.5 ถึง 5.25 เป็นสมการของแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆและสภาวะการดำเนินการสามารถดูได้จากตารางที่ 5.2 รายละเอียดเกี่ยวกับสายป้อนดูจากตารางที่ 5.3 และรูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์และพารามิเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ดูจากตารางที่ 5.4 โดยขั้นตอนการดำเนินการผลิต มีดังนี้

1. เริ่มต้นจากการชาร์จน้ำและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง $30^\circ C$
2. ให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์ให้ถึงอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ 80 องศาเซลเซียสที่ปฏิกิริยาต้องการ
3. เริ่มป้อนสายป้อนที่ประกอบด้วย โมโนเมอร์, ตัวเริ่ม และน้ำที่ใช้ละลายตัวเริ่มลงในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 768 กิโลกรัมต่อชม. เป็นเวลา 8 ชม. พร้อมกับควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่อยู่ที่เซ็ทพอยท์ 80 องศาเซลเซียสนี้

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆและสภาวะการดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์ที่ใช้ทำการทดลอง

อธิบาย	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
น้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์	MW_M	กิโลกรัมต่อกิโลโมล	86.09
น้ำหนักโมเลกุลของตัวเริ่ม (Initiator)	MW_I	กิโลกรัมต่อกิโลโมล	270.33
น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ	MW_w	กิโลกรัมต่อกิโลโมล	18
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของโมโนเมอร์	C_{pM}	กิโลแคลอรี/(กิโลกรัม. $^{\circ}$ C)	0.470
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	C_{pw}	กิโลแคลอรี/(กิโลกรัม. $^{\circ}$ C)	1.0
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของพอลิเมอร์	C_{pP}	กิโลแคลอรี/(กิโลกรัม. $^{\circ}$ C)	0.388275
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของแข็ง	C_{pPVA}	กิโลแคลอรี/(กิโลกรัม. $^{\circ}$ C)	0.388275
ค่าความหนาแน่นของโมโนเมอร์	ρ_M	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	920
ค่าความหนาแน่นของ PVA	ρ_{PVA}	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	1293
ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์	ρ_{pol}	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	1190
ค่าความหนาแน่นของน้ำ	ρ_w	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	1000
ค่ามวลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เริ่มต้น	Solid(t=0)	กิโลกรัม	512
ค่าสัดส่วนของ PVA เริ่มต้น	$f_{solid}^{(0)}$	-	0.08274
ค่าสัดส่วนของน้ำเริ่มต้น	$f_{water}^{(0)}$	-	0.914
ค่าสัดส่วนของโมโนเมอร์เริ่มต้น	$f_{Monomer}^{(0)}$	-	0.00
ค่าสัดส่วนของพอลิเมอร์เริ่มต้น	$f_{Polymer}^{(0)}$	-	0.00
ค่าสัดส่วนของตัวเริ่มเริ่มต้น	$f_{initiator}^{(0)}$	-	3.2e-03
ค่าอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของปฏิกิริยา	T_{RSP}	องศาเซลเซียส	80.0

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดของสายป้อนที่ถูกป้อนลงสู่เครื่องปฏิกรณ์

อธิบาย	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ปริมาณของโมโนเมอร์ในสายป้อน	monf	กิโลกรัม	5692
ปริมาณของตัวเริ่มในสายป้อน	inif	กิโลกรัม	42
ปริมาณของน้ำในสายป้อน	watf	กิโลกรัม	424
ความหนาแน่นเฉลี่ยของสายป้อน	ρ_{feed}	กิโลกรัม/เมตร ³	925.84
ความจุความร้อนเฉลี่ยของสายป้อน	Cp_{feed}	กิโลแคลอรี/(กิโลกรัม.°C)	0.508
อุณหภูมิของสายป้อน	T_{feed}	องศาเซลเซียส	30

ตารางที่ 5.4 ขนาดรูปร่าง และพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์

อธิบาย	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ปริมาตรของแจ็กเก็ต	V_J	ลูกบาศก์เมตร	4.1
ความจุความร้อนของของไหลในแจ็กเก็ต	Cp_J	กิโลแคลอรี/(กิโลกรัม.°C)	1.0
อัตราการไหลของของไหลที่เข้าแจ็กเก็ต	F_J	ลูกบาศก์เมตร/นาที	2.69
รัศมีของเครื่องปฏิกรณ์	r	เมตร	0.997
ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์	H	เมตร	4.13
ปริมาตรทั้งหมดของเครื่องปฏิกรณ์	V_{total}	ลูกบาศก์เมตร	12.89
พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์	A_{total}	ตารางเมตร	25.86
อุณหภูมิสูงสุดของแจ็กเก็ต	T_{Jmax}	องศาเซลเซียส	120
อุณหภูมิต่ำสุดของแจ็กเก็ต	T_{Jmin}	องศาเซลเซียส	20

5.3 การประยุกต์การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์

การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์สามารถทำได้โดยการปรับอุณหภูมิของของไหลในแจ็กเก็ต โดยในงานนี้เราเลือกการควบคุมแบบเจเนริกโมเดลเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (T_r) โดยการปรับอุณหภูมิของแจ็กเก็ต (T_J) ซึ่งเราสามารถประยุกต์การควบคุมแบบเจเนริกโมเดลเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบทช์ได้ โดยเลือก

สมการที่ 5.18 ซึ่งเป็นสมการอนุรักษ์พลังงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเซมิแบตช์ ซึ่งจะตัดแปลงเทอมซ้ายมือของสมการเป็นดังนี้

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{wCp_{feed}(T_{feed} - T_r) + UA(T_j - T_r)}{W_rCp_r} + \frac{Q_r}{W_rCp_r} \dots\dots\dots 5.26$$

จากสมการที่ 5.26 นี้เราสามารถหาอัลกอริทึมของตัวควบคุมจีเอ็มซีโดยการกำหนดเทอมอนุพันธ์ของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (T_r) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องการควบคุมให้อยู่ในรูปของเทอมพหุคูณอันดับ-อินทิกรัลของผลต่างระหว่างอุณหภูมิเซ็ทพอยท์กับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่วัดได้พร้อมทั้งแก้สมการหาค่าตัวแปรปรับ คืออุณหภูมิของของไหลในแจ็กเก็ต (T_j) จะได้ผลดังสมการนี้

$$T_j = T_{rm} + \frac{W_rCp_r}{U_rA_r} \left[K_1(T_{rsp} - T_{rm}) + K_2 \int_0^t (T_{rsp} - T_{rm}) dt \right] - \frac{w_m \cdot Cp_{feed}(T_{feed} - T_{rm})}{U_rA_r} - \frac{Q_r}{U_rA_r} \dots\dots\dots 5.27$$

- เมื่อ T_{rm} = อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)
- T_{jm} = อุณหภูมิของแจ็กเก็ตที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)
- T_{rsp} = อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของเครื่องปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)
- W_r = มวลรวมของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์
- Cp_r = ความจุความร้อนจำเพาะของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลแคลอรี/กิโลกรัม-องศาเซลเซียส)
- w_m = อัตราการไหลของฟีดที่วัดได้ (กิโลกรัม/ชั่วโมง)

สมการที่ 5.27 นี้อยู่ในรูปต่อเนื่อง แต่การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของตัวควบคุมจีเอ็มซีต้องถูกกำหนดให้อยู่ในรูปดิคริต ซึ่งจะได้ผลดังสมการข้างล่างนี้

$$T_j^{(k)} = T_{rm}^{(k)} + \frac{W_rCp_r}{U_rA_r} \left[K_1(T_{rsp} - T_{rm}^{(k)}) + K_2 \sum_0^{(k)} (T_{rsp} - T_r^{(k)}) \Delta t \right] - \frac{w_m^{(k)} Cp_{feed}(T_{feed} - T_{rm}^{(k)})}{U_rA_r} - \frac{Q_{rs}^{(k)}}{U_rA_r} \dots\dots\dots 5.28$$

เมื่อ Δt = เวลาในการสุ่มตัวอย่างในการวัด (Sampling time) (ชั่วโมง)

Q_{re} = ค่าความร้อนที่ได้จากการประมาณค่า (กิโลแคลอรี/ชั่วโมง)

$K_1 = \frac{2\xi}{\tau}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการจูน

$K_2 = \frac{1}{\tau^2}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการจูน

ในสมการที่ 5.28 นี้ค่า T_J^k ไม่ใช่อุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของแจ็กเก็ตแต่เป็นอุณหภูมิทั่วไปของแจ็กเก็ต ดังนั้นจากไดนามิกส์คอมเพนเสตของแจ็กเก็ตที่เป็นแบบจำลองอันดับหนึ่ง สามารถหาอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ของแจ็กเก็ตได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$T_{Jsp}^{(k)} = T_J^{(k-1)} + \frac{\tau_J}{\Delta t} (T_J^{(k)} - T_J^{(k-1)}) \quad \dots\dots\dots 5.29$$

จากคำตอบของสมการที่ 5.28 และ 5.29 จะให้ค่าอุณหภูมิเซ็ทพอยท์ทั่วไปของแจ็กเก็ตซึ่งจะถูกใช้ในการควบคุมเวลาต่อไป

ในการคำนวณค่าตัวแปรปรับ (อุณหภูมิของของเหลวในแจ็กเก็ต, (T_J^k)) ตามสมการที่ 5.28 จะเห็นว่ามีความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยา, (Q_r^k) ซึ่งเราไม่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นต้องทำการประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

5.4 การประมาณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

สำหรับในการทดลองนี้ ได้ใช้ออนไลน์แคลอริเมตริกมอนิโอรัง (On-Line Calorimetric Monitoring) ที่ R. W. Chylla and J. David Campbell, 1997 ได้ให้อัลกอริทึมในการประมาณค่าความร้อนสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเขมิเบตซ์ไว้ โดยใช้ทั้งสมการดุลพลังงานในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนี้

สมการดุลความร้อนรอบเครื่องปฏิกรณ์ :

$$W_r C_{p_r} \frac{dT_r}{dt} = w C_{p_{feed}} (T_{feed} - T_r) + Q_J + Q_r \quad \dots\dots\dots 5.30$$

จากสมการที่ 5.30 สามารถแก้สมการหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$Q_{re} = W_r C p_r \frac{dT_{rm}}{dt} - w_m C p_{feed} (T_{feed} - T_{rm}) - U_r A_r (T_{Jm} - T_{rm}) \quad \dots\dots\dots 5.31$$

สมการที่ 5.31 สามารถประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมจีเอ็มซีได้แต่ต้องทำให้อยู่ในรูปดิคริต โดยที่ค่า T_r, T_J, w_m สามารถวัดค่าได้โดยตรง แต่การประมาณค่าด้วยวิธีเชิงตัวเลขบนเทอมอนุพันธ์ของ T_r ก่อนข้างจะมีความไวต่อความผิดพลาดในการวัด วิธีแก้ไขสามารถทำได้โดยใช้ตัวกรองและวิธีการประมาณค่าอันดับสูงบนเทอมอนุพันธ์เหล่านั้น ดังนี้

$$T_{rf}^{(k)} = T_{rf}^{(k-1)} + \frac{\Delta t (T_{rf}^{(k)} - T_{rf}^{(k-1)})}{\tau_f} \quad \dots\dots\dots 5.32$$

$$T_{Jf}^{(k)} = T_{Jf}^{(k-1)} + \frac{\Delta t (T_{Jm}^{(k)} - T_{Jf}^{(k-1)})}{\tau_f} \quad \dots\dots\dots 5.33$$

$$\frac{\Delta T_{rf}^{(k)}}{\Delta t} = \frac{3T_{rf}^{(k)} - 4T_{rf}^{(k-1)} + T_{rf}^{(k-2)}}{2\Delta t} \quad \dots\dots\dots 5.34$$

$$Q_{re}^{(k)} = W_r C p_r \frac{\Delta T_{rf}^{(k)}}{\Delta t} - w_m^{(k)} \cdot C p_{feed} (T_{feed} - T_{rf}^{(k)}) - U_r A_r (T_{Jf}^{(k)} - T_{rf}^{(k)}) \quad \dots\dots\dots 5.35$$

$$Q_{ref}^{(k)} = Q_{ref}^{(k-1)} + \frac{\Delta t (Q_{re}^{(k)} - Q_{ref}^{(k-1)})}{\tau_f} \quad \dots\dots\dots 5.36$$

ซึ่งสัคริป f ขี้ให้เห็นถึงค่าที่ถูกกรองของ T_{rm}, T_{Jm} และ Q_{re}

สรุปการออกแบบตัวควบคุมจีเอ็มซี

จากสมการที่ 5.28, 5.29, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 และ 5.36 ทั้งหมดนี้เป็นสมการของตัวควบคุมและ สมการของตัวประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยแผนภาพขั้นตอนการควบคุมสามารถดูได้จากรูปที่ 5.1 ข้างล่างนี้



รูปที่ 5.1 ภาพแสดงขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยตัวควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับการประมาณค่าความร้อนแบบออนไลน์

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่ามีการวัดเอาที่พุทของกระบวนการแบบเซมิแบทซ์ได้แก่ ค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (T_{rm}), อุณหภูมิของของเหลวในแจ็กเก็ต (T_{jm}) และอัตราการป้อนโมโนเมอร์ (ω_{mm}) เพื่อนำมาประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาด้วยตัวประมาณค่าความร้อนออนไลน์ ค่าความร้อนที่ประมาณได้จะถูกส่งพร้อมกับ ข้อมูลจากการวัดให้กับตัวควบคุมจีเอ็มซีเพื่อทำการคำนวณค่าอุณหภูมิเชื้อทพอยท์ของแจ็กเก็ตเพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป

5.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ และพารามิเตอร์ที่ได้จากการจูนตัวควบคุม

การจูนตัวควบคุมสามารถทำได้ง่ายโดยการกำหนดผลการตอบสนองที่ต้องการ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ในงานนี้ก็เช่นเดียวกันคือ ต้องการให้ผลการตอบสนองในช่วงขึ้นอุณหภูมิให้ถึงเชื้อทพอยท์ภายใน 20 นาที จากรูปที่ 4.2 เมื่อเราเลือกรูปแบบของผลการตอบสนองที่มีค่า $\xi = 10$ ดังนั้นจะได้ค่า $\tau = 80$ นาที โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจูนสามารถดูได้จากตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวควบคุมและตัวประมาณค่าความร้อนแบบออนไลน์

อธิบาย	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
พารามิเตอร์ที่ได้จากการจูนตัวที่ 1	K_1	ต่อนาที	0.25
พารามิเตอร์ที่ได้จากการจูนตัวที่ 2	K_2	ต่อนาที ²	1.5625e-04
มวลของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์	W_r	กิโลกรัม	6200
ความจุความร้อนของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์	Cp_r	$kcal / (kg \cdot ^\circ C)$	0.95
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	U_r	$kcal / (m^2 \cdot min \cdot ^\circ C)$	57.85
พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	A_r	ตารางเมตร	6.1
ค่าคงที่การกรองสัญญาณ	τ_f	นาที	1
ค่าคงที่ไทม์ของแจ็กเก็ต	τ_j	นาที	1.98
เวลาในการสุ่มตัวอย่างการวัด	Δt	นาที	2
หมายเหตุ เป็นค่าที่ได้จากการจูนที่สภาวะปกติไม่มีความผิดพลาดในระบบ			

5.6 การทดสอบความทนทาน และสมรรถนะของตัวควบคุม

ในงานนี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์แบบเซมิแบทช์ด้วยตัวควบคุมจีเอ็มซีทีที่ร่วมกับตัวประมาณค่าความร้อนที่คายออกมา โดยตัวควบคุมจีเอ็มซีทีที่ออกแบบมาได้จะถูกเปรียบเทียบกับสมรรถนะ และความทนทานในการควบคุมกับตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดีที่อยู่ในรูปแบบเวโลซิตี (Velocity Form) ดังนี้

$$T_{Jsp}^{(k+1)} = T_J^{(k+1)} + K_C (T_r^{(k)} - T_r^{(k+1)}) - \frac{K_C}{\tau_I} (T_{rsp} - T_r^{(k+1)}) \Delta t + \frac{K_C \tau_D}{\Delta t} (2T_r^{(k)} - T_r^{(k+1)} - T_r^{(k-1)})$$

.....5.37

โดยที่ K_C = ค่าคงที่เกน (องศาเซลเซียสต่อองศาเซลเซียส)

τ_I = เวลาอินทิกรัล (ชั่วโมง)

τ_D = เวลาอนุพันธ์ (ชั่วโมง)

เมื่อ K_C , τ_I และ τ_D เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการจูน ซึ่งวิธีการจูนตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดีในงานนี้นั้นใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial And Error) ที่สภาวะการดำเนินการปกติไม่มีความผิดพลาดจากพารามิเตอร์ และค่าที่ได้จากการจูนดูได้จากตารางที่ 5.6 ข้างล่างนี้ และเหตุผลที่เลือกค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มาใช้สามารถดูได้จากภาคผนวก ข.

ตารางที่ 5.6 ค่าที่ได้จากการจูนตัวควบคุมพีไอดี

อธิบาย	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ค่าคงที่เกน	K_C	$^{\circ}\text{เซลเซียส}/^{\circ}\text{เซลเซียส}$	4.4
เวลาอินทิกรัล	τ_I	นาที	6.5
เวลาอนุพันธ์	τ_D	นาที	0.31

สำหรับการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมนั้น เป็นการทดสอบทั้งสองตัวควบคุม โดยที่ให้สภาวะการดำเนินการ และ/หรือ ให้มีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะการดำเนินการปกติ P. R. Lee And G. R. Sullivan, 1988 ได้อธิบายเกี่ยวกับการทำให้มีความผิดพลาดในแบบจำลองแบบเชิงเส้นนั้นสามารถทำได้ง่าย โดยการทำให้มีการเปลี่ยนแปลงในค่าคงที่เกนและค่าคงที่เวลา แต่ Barry J. Cott And Sandro Marchietto; 1989 ได้อธิบายว่าจะขยายผลมาถึงระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตซ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ง่าย โดยพวกเขาได้ทดสอบความทนทานของตัวควบคุมที่พวกเขาได้ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตซ์ โดยให้มีความผิดพลาดในพารามิเตอร์ 5 กรณีด้วยกันคือ

1. มีการเปลี่ยนแปลงในน้ำหนักของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์
2. มีการเปลี่ยนแปลงในอัตราการเกิดปฏิกิริยา
3. มีการเปลี่ยนแปลงในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
4. มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่ 2 และ 3 รวมกัน
5. มีการเปลี่ยนแปลงในชนิดของปฏิกิริยา คือ เป็นปฏิกิริยาคูความร้อนแทน

ส่วนการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ออกแบบได้ในงานนี้จะทำคล้ายกับงานของ Barry J. Cott And Sandro Marchietto; 1989 คือให้มีความผิดพลาดในพารามิเตอร์ 4 กรณี ดังนี้

1. ให้อัตราการป้อนสายป้อนเปลี่ยนจาก 12.83 กิโลกรัมต่อนาที เป็น 17.962 กิโลกรัมต่อนาที (เพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์)
2. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนโดยเพิ่มเป็น 1.5 เท่าจากของเดิม
3. ให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง 20 เปอร์เซ็นต์จากของเดิม
4. กรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 รวมกัน
5. กรณีที่ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์มีผลของการเจด ตามสมการที่ 5.22 และ สมการที่ 5.23

โดยที่การทดลองเหล่านี้ จะถูกจำลองในคอมพิวเตอร์โปรแกรมแมทแลบ โดยแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบรุงเง-คุตตาอันดับสี่ และคาดหมายว่าผลการทดลองที่ได้ คือการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์ด้วยตัวควบคุมจีเอ็มซีจะมีสมรรถนะ และความทนทานที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี ซึ่งจะวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์โปรแกรมแมทแลบในบทต่อไป