บทที่ 5
กรณีศึกษาที่ 1: เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ

กรณีศึกษาที่จะทำในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 4 กรณีคือ ออกแบบขนาดท่อ, ออกแบบระบบเชิงเส้นแบบปรับเปลี่ยน (the linear retrofit design), ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องแบบมีปฏิกิริยาย้อนกลับไม่ได้ และออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องแบบมีปฏิกิริยาย้อนกลับได้ โดยกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 เป็นกรณีศึกษาที่ทำเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่เขียนขึ้น เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในบทที่ 4 ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบผลจากงานวิจัยนี้กับผลงานวิจัยที่ผ่านมาในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าโปรแกรมออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนทั้งวิธีแบบดีเทอร์มินิสติก และสโตแคสติกที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องแล้ว จึงนำโปรแกรมที่เขียนขึ้นไปทำออปติไมซ์เพื่อช่วยออกแบบหาจุดที่เหมาะสมกับกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป สำหรับในงานวิจัยนี้จะนำโปรแกรมนี้ไปออกแบบหาขนาดเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรม และจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่เคยมีผู้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องมาก่อน

สำหรับในบทที่ 5 นี้จะแสดงขั้นตอน และผลการออปติไมซ์ทั้งกรณีปกติ, กรณีมีความไม่แน่นอน ของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ โดยใช้โปรแกรมเดียวกับในบทที่ 4 นอกจากนี้ในบทนี้ยังแสดงผลการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนเปรียบเทียบการหาค่าจากวิธีดีเทอร์มินิสติก, วิธีสโตแคสติก และวิธีผสมทั้งดีเทอร์มินิสติกและสโตแคสติกด้วย ส่วนการออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ที่มีปฏิกิริยาย้อนกลับได้จะกล่าวถึงในบทที่ 6

5.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ

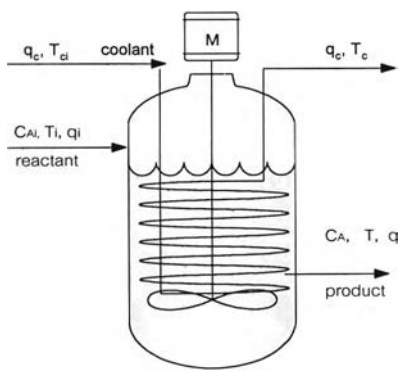
กระบวนการนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) ซึ่งมีปฏิกิริยาเคมีชนิดคายความร้อนอย่างรุนแรง และแบบไม่ย้อนกลับ (irreversible exothermic reactor) ที่เคยออกแบบโดยไพศาล กิตติศุภกร, อมรชัย อาภรณ์วิชานพ และคณะ (2540) ปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนสาร A ไปเป็นสาร B ซึ่งทำให้พลังงานความร้อนจำนวนหนึ่งถูกปล่อยออกมา ทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้น และใช้สารหล่อเย็นที่ไหลอยู่ภายในขดลวด เพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อุณหภูมิตามที่ต้องการ

ลักษณะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น: $A \xrightarrow{k} B$

อัตราการเกิดปฏิกิริยา: $r_A = ke^{-Ea/RT}C_A$

ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา : ΔH

หลักการของระบบนี้คือจำลองการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารโดยใช้น้ำแทนสารเคมีทั้งหมดในระบบ ปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูง (highly exothermic reaction) ซึ่งควบคุมยากโดยปฏิกิริยาจะดำเนินไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CSTR) ในส่วนของความร้อนที่เกิดขึ้นขณะสารทำปฏิกิริยากันนั้นจะใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่ระบบแทน สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นั้นออกแบบให้ใช้น้ำไหลผ่านขดลวดภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นตัวระบายความร้อน



รูปที่ 5.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ $A \longrightarrow B$

แบบจำลองที่ใช้ประกอบด้วยสมการอนุรักษ์ต่าง ๆ ดังนี้

สมการอนุรักษ์มวลรวมของถังปฏิกรณ์

$$\frac{d\rho V}{dt} = \rho_i q_i - \rho q \tag{5.1}$$

สมการอนุรักษ์มวลของสาร A

$$\frac{dVC_A}{dt} = q_i C_{Ai} - qC_A - r_A V \tag{5.2}$$

สมการอนุรักษ์พลังงานภายในเครื่องปฏิกรณ์

$$\rho Cp\frac{dVT}{dt} = \rho_i q_i CpT_i - \rho qCpT - \Delta H(r_A)V - UA(T - T_c) \tag{5.3}$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ ขึ้นกับค่าความหนาแน่น ρ และปริมาตร V ของมวลภายในถัง และจากการสมมติให้ความหนาแน่นของสารจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมี จึงประมาณได้ว่าค่า ρ_i เท่ากับ ρ ดังนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดขึ้น อัตราการไหลขาเข้าจึงเท่ากับอัตราการไหลขาออก

$$q_i - q = 0 \tag{5.4}$$

โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$r_A = k_o C_A \tag{5.5}$$

และสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามความสัมพันธ์ของอารีเนียส (Arrhenius reaction)

$$k_o = k \exp(-Ea / RT) \tag{5.6}$$

แทนค่าสมการที่ (5.4) และ (5.6) ในสมการที่ (5.1) ถึงสมการ (5.3) ดังนั้น สมการอนุรักษ์จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{dt} = 0 \tag{5.7}$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{q}{V}\left(C_{Ai} - C_A\right) - ke^{-Ea/RT} C_A \tag{5.8}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{V}\left(T_i - T\right) - \frac{\Delta H}{\rho Cp}\left(ke^{-Ea/RT} C_A\right) - \frac{UA}{\rho CpV}\left(T - T_c\right) \tag{5.9}$$

ในที่นี้ให้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นคงที่ที่อุณหภูมิ T_c โดยที่ ΔH คือความร้อนของปฏิกิริยา (heat of reaction) และ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (overall heat transfer coefficient)

ตาราง 5.1 ข้อมูลของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องแบบมีปฏิกิริยา A $\longrightarrow$ B

ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่า	หน่วย
V	ปริมาตรของถังกวน	-	m^3
T	อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์	-	K
C_A	ความเข้มข้นของสาร A ในถัง	-	$kmol/m^3$
C_{Ai}	ความเข้มข้นของสาร A ในสายป้อน	15	$kmol/m^3$
q	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์	0.003	m^3/min
T_i	อุณหภูมิของสายป้อน	300	K
T_c	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	328	K
ρ	ความหนาแน่นของสารในถังกวน	1000	kg/m^3
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด	79.488	kcal/(min.K)
A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	0.125	m^2
Cp	ค่าความจุความร้อนของสาร	1	kcal/(kmol.K)
k	สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา	1.18×10^7	min^{-1}
Ea	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา	11,922	kcal/kmol
R	ค่าคงที่ของก๊าซ	1.987	kcal/(kmol.K)
ΔH	ค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา	-8,000	kcal/kmol

5.2 การออปติไมซ์ของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ

การออปติไมซ์ในงานวิจัยนี้จะทำการออปติไมซ์ในสภาวะปกติ (Normal case) คือกรณีที่ให้พารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ อยู่นิ่ง มีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนนั้นจะทำการแบ่งความไม่แน่นอนเป็น 2 ชนิดคือพารามิเตอร์และตัวแปร โดยในทางปฏิบัติการแล้วพารามิเตอร์ (parameter) เช่น ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics), ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (kinetics) จะเป็นค่าที่มีการกระจายแบบดิสครีต เป็นค่าที่ได้จากการทดลองทราบเพียงช่วงความไม่แน่นอน ซึ่งได้จากการประมาณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีออปติไมซ์แบบดีเทอร์มินิสติก ช่วยหาจุดที่เหมาะสมกรณีพารามิเตอร์ไม่แน่นอน ส่วนค่าตัวแปร (variable) ในขณะปฏิบัติการจะเป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา มีลักษณะการแจกแจงแบบฟังก์ชันต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีออปติไมซ์แบบสโตแคสติกช่วยในการหาจุดที่เหมาะสมกรณีตัวแปรไม่แน่นอน นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังทดลองทำวิธีออปติไมซ์ทั้งกรณีที่พารามิเตอร์ และตัวแปรไม่แน่นอนด้วย นั้นคือวิธีออปติไมซ์แบบผสมทั้งดีเทอร์มินิสติก และสโตแคสติก ซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาแล้ว

5.2.1 การออปติไมซ์สภาวะปกติ (Normal case)

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนรูปแบบปัญหาการออปติไมซ์ (optimization formulation) กรณีให้ตัวแปร และพารามิเตอร์ต่างเป็นค่าคงที่อยู่ที่ค่าปกติ (normal) หรือค่าเฉลี่ย (mean) ของระบบ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับเขียนได้ดังนี้

$$\min_{V,T,C_A} 30092.2(V^{0.54}) + 1300q + 2T$$

โดยมีเงื่อนไข

$$\frac{q}{V}\left(C_{Ai} - C_A\right) - ke^{-Ea/RT}C_A = 0$$

$$\frac{q}{V}\left(T_i - T\right) - \frac{\Delta H}{\rho Cp}\left(ke^{-Ea/RT}C_A\right) - \frac{UA}{\rho CpV}\left(T - T_c\right) = 0 \qquad (5.10)$$

$$0.8 - \frac{(C_{Ai} - C_A)}{C_{Ai}} \le 0$$

$$300 < T < 360$$

กรณีศึกษากระบวนการนี้จะออปติไมซ์หาขนาดเครื่องปฏิกรณ์, อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ และความเข้มข้นของสาร A ขาออกเครื่องปฏิกรณ์ ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่ำที่สุด โดยมีสมการอนุรักษ์มวลสาร A และสมการอนุรักษ์พลังงานในเครื่องปฏิกรณ์เป็นข้อจำกัดที่เป็นสมการ นอกจากนี้

ยังมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (conversion) ของสาร A ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.80 เป็นข้อจำกัดที่เป็นอสมการ ฉะนั้นการออปติไมซ์กระบวนการนี้จะเป็นการหาตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด 3 ตัว ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่ำที่สุด โดยมีข้อจำกัดที่เป็นสมการ 2 สมการ และข้อจำกัดที่เป็นอสมการ 2 อสมการ

5.2.2 การออปติไมซ์ภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอน

การออปติไมซ์กรณีพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอนนั้น จะใช้วิธีการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก ซึ่งจะใช้วิธีเดียวกับกรณีออกแบบท่อ ที่กล่าวแล้วในบทที่ 4 นำมาออปติไมซ์กระบวนการ CSTR ซึ่งมีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ โดยจะกำหนดให้ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา (ΔH) และสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) มีความคลาดเคลื่อน (deviation) จากค่าปกติ $\pm 10\%$ ดังนี้

$$-8800 \le \Delta H \le -7200 \tag{5.11}$$

$$1.062 \times 10^7 \le k \le 1.298 \times 10^7 \tag{5.12}$$

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน

พารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอน	ค่าปกติ	ค่าเบี่ยงเบนทางบวก	ค่าเบี่ยงเบนทางลบ
$-\Delta H$	8,000	800	800
k	1.18×10^7	1.18×10^6	1.18×10^6

สถานการณ์ของความไม่แน่นอนที่ปกติคือ $\Delta H^N, k^N$ ส่วนสถานการณ์ที่ดีที่สุด คือ ความไม่แน่นอนที่ทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่าน้อยที่สุด นั้นคือ สถานการณ์ที่ความไม่แน่นอนมีค่าเท่ากับ $\Delta H^L, k^U$ และสถานการณ์ที่แย่ที่สุด คือ เมื่อความไม่แน่นอนเท่ากับ $\Delta H^U, k^L$ ซึ่งทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่าสูงที่สุด จากนั้นแล้วนำทั้ง 3 สถานการณ์มาออปติไมซ์หาปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้งานได้กับทุกสถานการณ์ โดยทำให้ค่าใช้จ่ายคาดหวังมีค่าต่ำสุด ซึ่งค่าใช้จ่ายคาดหวังคำนวณได้จากค่าใช้จ่ายในแต่ละสถานการณ์ที่ดี ปกติ เลว คูณกับแฟกเตอร์น้ำหนักหรือโอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิดในแต่ละสถานการณ์

ก่อนการออปติไมซ์ต้องกำหนดแฟกเตอร์น้ำหนัก (σ) หรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดแต่ละเหตุการณ์ ซึ่งในกระบวนการนี้ได้กำหนดแฟกเตอร์น้ำหนักของแต่ละสถานการณ์ดังนี้

สถานการณ์ดีที่สุด $\theta^1 = \{\Delta H^L, k^U\} = \{-8800\,,\ 1.062\times10^7\}, \quad \sigma^1 = 0.1$

สถานการณ์ปกติ $\theta^2 = \{\Delta H^N, k^N\} = \{-8000,\ 1.18\times10^7\}, \quad \sigma^2 = 0.8$ (5.13)

สถานการณ์เลวที่สุด $\theta^3 = \{\Delta H^U, k^L\} = \{-7200,\ 1.298\times10^7\}, \quad \sigma^3 = 0.1$

เมื่อ σ^1, σ^2 และ σ^3 คือ แฟกเตอร์น้ำหนัก หรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดของสถานการณ์ดีที่สุด, ปกติ และเลวที่สุดตามลำดับ ซึ่งเมื่อใส่ความไม่แน่นอนทั้ง 3 สถานการณ์เพื่อหาปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำให้กระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว และสอดคล้องกับข้อจำกัดของกระบวนการ ตลอดทุกสถานการณ์ของความไม่แน่นอน จะได้ดังสมการออปติไมซ์ที่ (5.14)

$$\min_{V,T^p,C_A^p} 30092.2(V^{0.54}) + \sum_{p=1}^{3}\sigma^p(1300q + 2T^p)$$

โดยมีเงื่อนไข

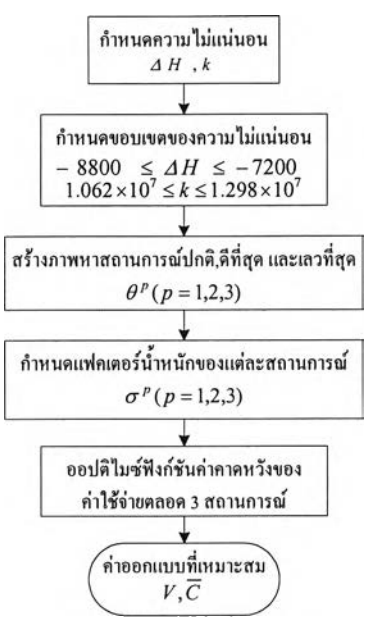
$$\frac{q}{V}\left(C_{Ai} - C_A^p\right) - k^p e^{-Ea/RT^p} C_A^p = 0$$

$$\frac{q}{V}\left(T_i - T^p\right) - \frac{\Delta H^p}{\rho C_{\bar{p}}}\left(k^p e^{-Ea/RT^p} C_A^p\right) - \frac{UA}{\rho C p V}\left(T^p - T_c\right) = 0 \qquad (5.14)$$

$$0.8 - \frac{(C_{Ai} - C_A^p)}{C_{Ai}^p} \le 0$$

$$300 < T^p < 360$$

จากสมการ (5.14) เป็นสมการที่ใส่ความไม่แน่นอนแบบสร้างภาพ (scenario) ตามวิธีของ Grossmann และ Sargent (1978) จะได้ตัวแปรตัดสินใจเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 9 และมี 6 สมการข้อจำกัด, 6 อสมการข้อจำกัด ซึ่งการแก้ปัญหาระบบนี้สามารถแสดงในรูปไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหาออปติไมซ์ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ กรณีพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน

5.2.3 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอนชนิดตัวแปร (variable) จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลามีการแจกแจงแบบฟังก์ชันต่อเนื่อง มักเป็นค่าที่ได้จากการเครื่องวัด ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีออปติไมซ์แบบสโตแคสติกตามวิธีออกแบบระบบปรับเปลี่ยน ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาออปติไมซ์แบบสองขั้นตอน (two stage programming) โดยตรง ช่วยในการออกแบบหาขนาดปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสม โดยกำหนดให้อัตราการไหล และอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ เป็นตัวแปรไม่แน่นอนแบบฟังก์ชันการกระจายแบบปกติเขียนในรูปสัญลักษณ์ได้เป็น $N(\mu,\sigma^2)$ เมื่อ μ คือค่าเฉลี่ยหรือค่าปกติ และ σ^2 คือ ค่าความแปรปรวนของตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน แสดงตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน

ตัวแปรไม่แน่นอน	ฟังก์ชันการกระจาย	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนทางบวก	ค่าเบี่ยงเบนทางลบ
q (m^3/min)	$N(3\times10^{-3},1\times10^{-8})$	0.0030	0.0003	0.0003
T_i (K)	$N(300,4)$	300	6	6

การออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนกรณีตัวแปรมีการแจกแจงแบบปกติ ของกระบวน CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ จะใช้วิธีการแก้ปัญหาออปติไมซ์แบบสโตแคสติก 2 ขั้นตอน ดังนี้

$$\min_{V} 30092.2(V^{0.54}) + \underset{q,T_i}{E}\{\min_{T,C_A} 1300q + 2T\}$$

โดยมีเงื่อนไข

$$\frac{q}{V}\left(C_{Ai}-C_A\right)-ke^{-Ea/RT}C_A=0$$

$$\frac{q}{V}\left(T_i-T\right)-\frac{\Delta H}{\rho Cp}\left(ke^{-Ea/RT}C_A\right)-\frac{UA}{\rho CpV}\left(T-T_c\right)=0 \qquad (5.15)$$

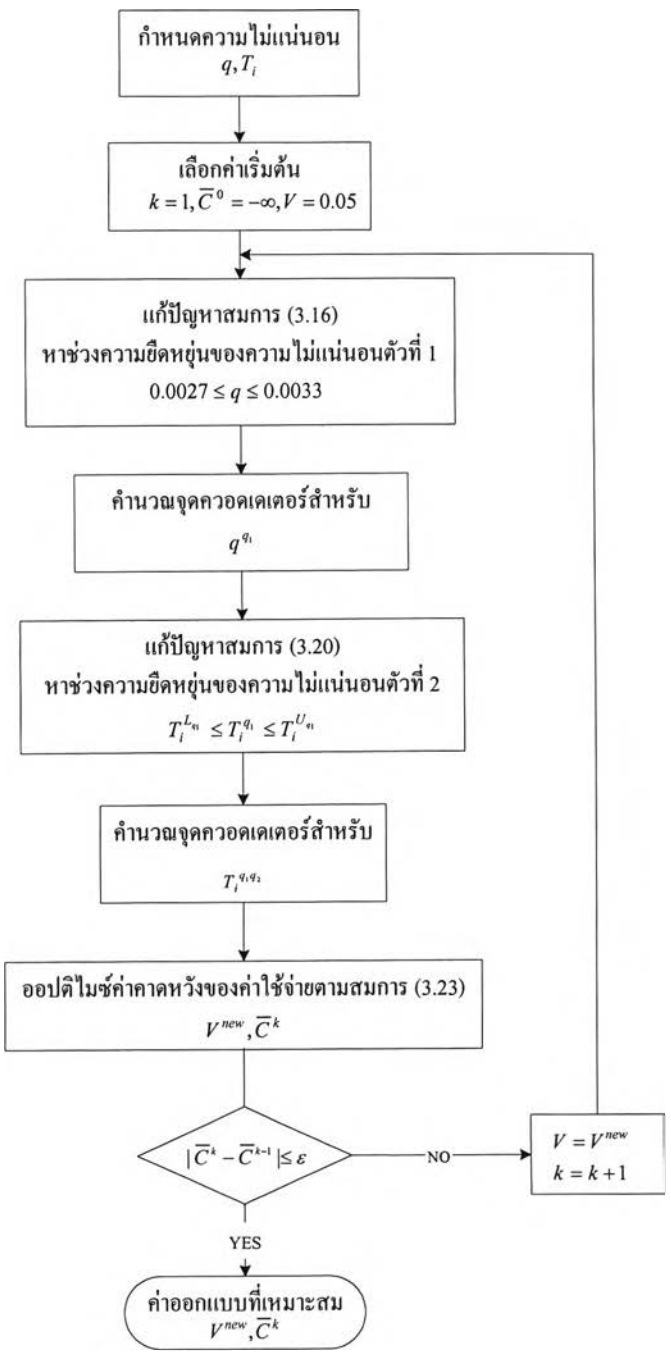
$$0.8-\frac{(C_{Ai}-C_A)}{C_{Ai}}\le 0$$

$$300 < T < 360$$

$$q = N(3\times10^{-3},1\times10^{-8}), \qquad T_i = N(300,4)$$

เมื่อใช้วิธีการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบสโตแคสติกตามที่เสนอในบทที่ 3 ปัญหา (5.15) จะเป็นปัญหาออปติไมซ์ที่มีตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด 51 ตัว และมีข้อจำกัดทั้งหมด 100 ข้อจำกัด ซึ่งในจำนวนนี้แบ่งเป็นข้อจำกัดที่เป็นสมการ 50 ข้อจำกัด และข้อจำกัดที่เป็นอสมการ 50 ข้อจำกัด โดยสมการ (5.15) สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วิธีการหาคำตอบตามไดอะแกรมที่ 5.3 ซึ่ง

เป็นไดอะแกรมที่มีลักษณะเดียวกับการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบสโตแคสติก รูปที่ 3.5 ตามเสนอในบทที่ 3 โดยไดอะแกรมรูปที่ 5.3 นี้เป็นไดอะแกรมที่แสดงขั้นตอน ในการหาขนาดเครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายคาดหวังต่ำที่สุด เมื่ออัตราการไหล และอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นตัวแปรสุ่มมีการกระจายแบบปกติ รอบ ๆ ค่าเฉลี่ย 3×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และ 300 องศาเคลวินตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหาออปติไมซ์ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ กรณีตัวแปรมีความไม่แน่นอน

5.2.4 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน

ในงานวิจัยนี้ยังได้ออปติไมซ์หาขนาดเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับกรณีที่กระบวนการทั้งพารามิเตอร์และตัวแปรไม่แน่นอน โดยพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอน ได้แก่ สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา และความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา กำหนดให้มีการกระจายแบบดิสครีต ส่วนตัวแปรที่ไม่แน่นอน ได้แก่ อัตราการไหล และอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะให้มีการกระจายแบบฟังก์ชันต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการออปติไมซ์แบบ 2 ขั้นตอนได้ดังนี้

$$\min_{V} 30092.2(V^{0.54}) + \underset{q,T_i}{E}\{\min_{T^p,C_A^p} \sum_{p=1}^{3} \sigma^P (1300q + 2T^p)\}$$

โดยมีเงื่อนไข

$$\frac{q}{V}\left(C_{Ai} - C_A^p\right) - k^p e^{-Ea/RT^p} C_A^p = 0$$

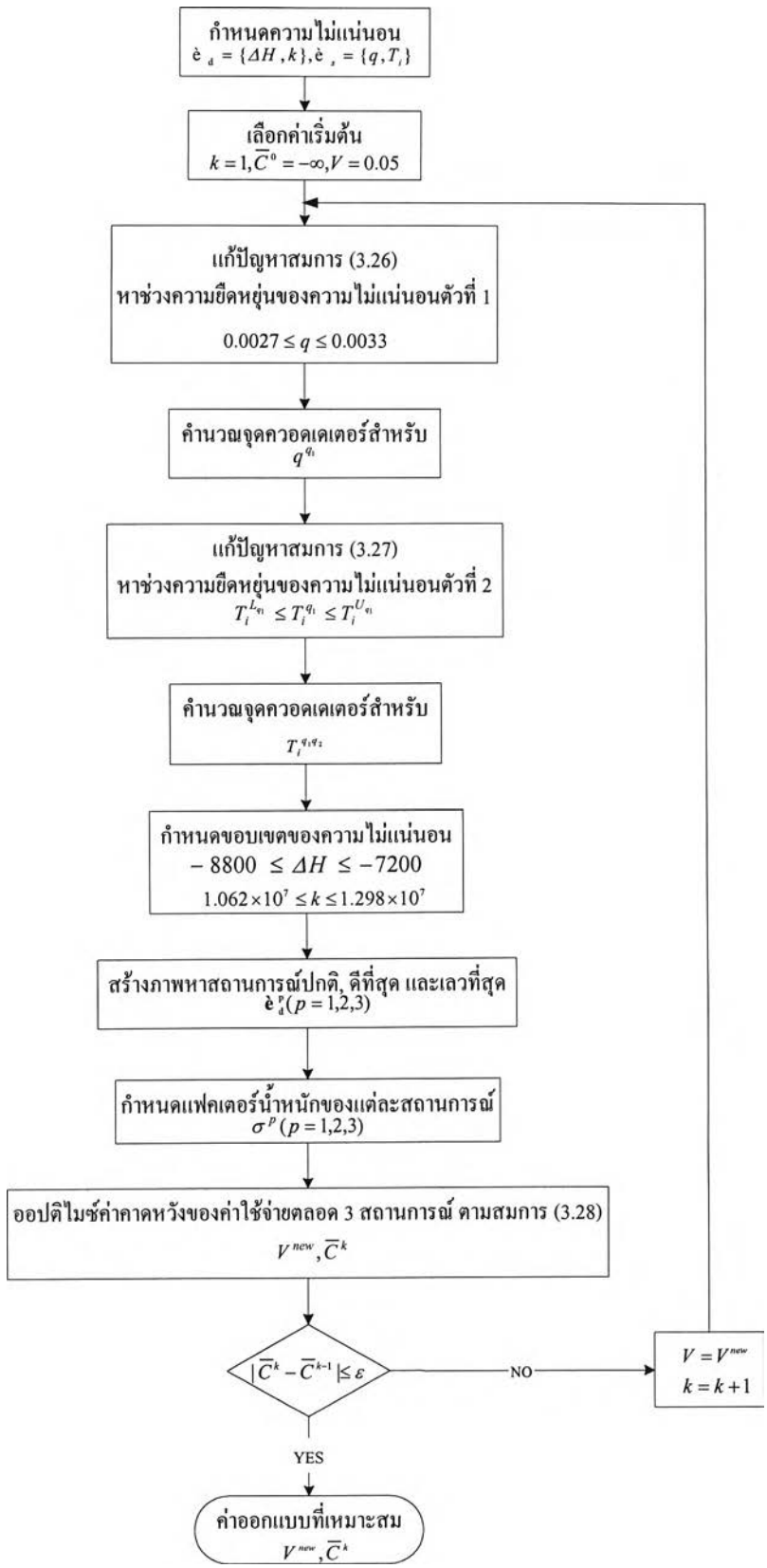
$$\frac{q}{V}\left(T_i - T^p\right) - \frac{\Delta H^p}{\rho Cp}\left(k^p e^{-Ea/RT^p} C_A^p\right) - \frac{UA}{\rho Cp V}\left(T^p - T_c\right) = 0 \qquad (5.16)$$

$$0.8 - \frac{(C_{Ai} - C_A^p)}{C_{Ai}^p} \le 0$$

$$300 \le T^p \le 400$$

$$q = N(3\times10^{-3}, 1\times10^{-8}), \qquad T_i = N(300,4)$$

ซึ่งปัญหาในสมการ (5.16) จะใช้วิธีออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบผสมทั้งดีเทอร์มินิสติกและสโตแคสติก จะเป็นปัญหาออปติไมซ์ที่มีตัวแปรตัดสินใจ 151 ตัว และมีข้อจำกัดทั้งหมด 300 ข้อจำกัด ซึ่งในจำนวนนี้แบ่งเป็นข้อจำกัดที่เป็นสมการ 150 ข้อจำกัด และข้อจำกัดที่เป็นอสมการ 150 ข้อจำกัด โดยการแก้ปัญหาสมการ (5.16) จะแสดงในรูปไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมแก้ปัญหาออปติไมซ์ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ กรณีพารามิเตอร์และตัวแปรมีความไม่แน่นอน

5.3 ผลการออปติไมซ์ของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ

ผลการออปติไมซ์ของกรณีศึกษานี้ทั้งกรณีปกติ และกรณีมีความไม่แน่นอนแบบต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5.4 นอกจากนี้ยังได้แสดงผลของการออกแบบโดยวิธีโอเวอร์ดีไซน์ ซึ่งเป็นการคูณแฟกเตอร์เพิ่มเข้าไปจากผลการออปติไมซ์กรณีปกติ เพื่อเปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ด้วย

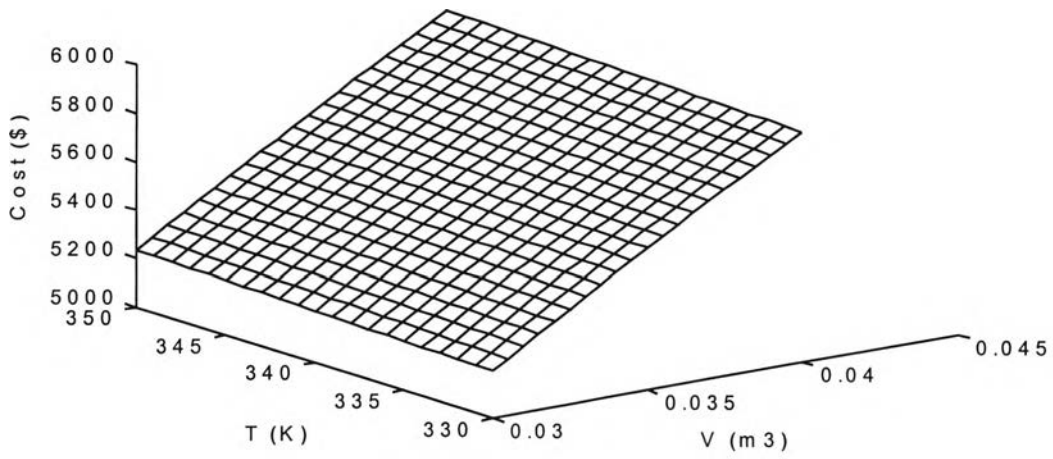
ตารางที่ 5.4 ผลออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาย้อนกลับไม่ได้

ตัวแปรตัดสินใจ	กรณีปกติ		กรณีมีความไม่แน่นอน		
	ค่า	โอเวอร์ดีไซน์	พารามิเตอร์	ตัวแปร	พารามิเตอร์และตัวแปร
$\overline{C}$ ($)	5,886	6,886	6,541	6,185	6,903
V (m^3)	0.0387	0.0503	0.0481	0.0428	0.0537
T (K)	343.77	446.90	344.90	344.30	345.34
T^L (K)	-	-	341.54	341.87	339.82
T^U (K)	-	-	348.21	346.98	351.57
C_A ($kmol/m^3$)	3.000	3.900	2.391	2.705	2.178
C_A^L ($kmol/m^3$)	-	-	1.912	2.453	1.571
C_A^U ($kmol/m^3$)	-	-	3.000	3.000	3.000

5.3.1 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์สภาวะปกติ

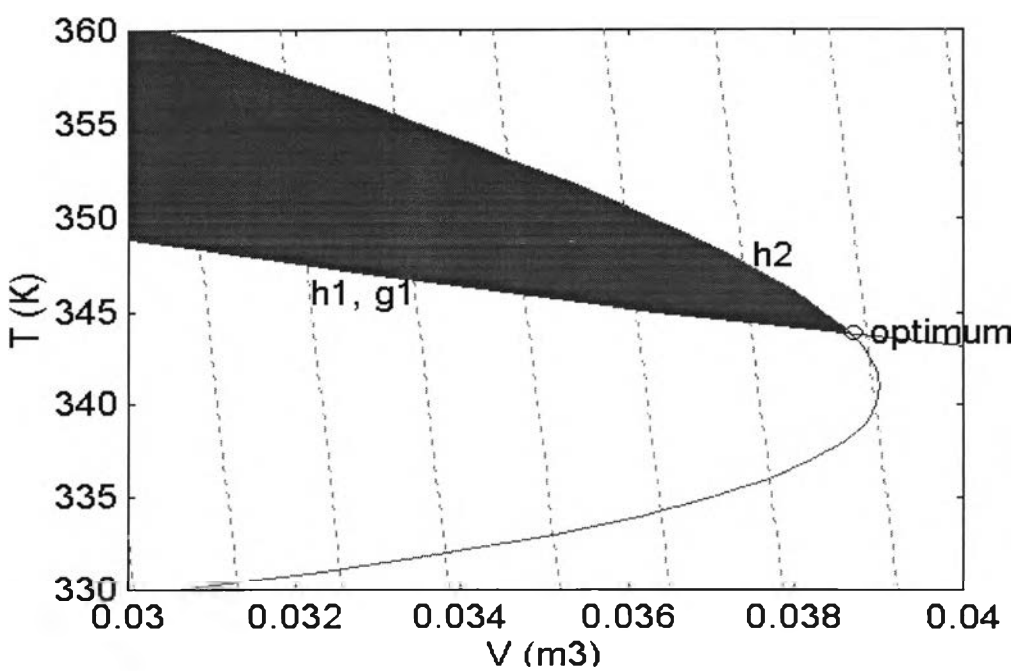
สำหรับผลการออปติไมซ์กระบวนการ CSTR ที่มีปฏิกิริยาย้อนกลับได้กรณีปกติ แสดงได้ดังตารางที่ 5.4 ผลการออปติไมซ์จะได้ขนาดเครื่องปฏิกรณ์ 0.0387 ลูกบาศก์เมตร, อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 343.77 องศาเคลวิน และความเข้มข้นของสาร A ขาออกเท่ากับ 3.00 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมด ของกระบวนการนี้ต่ำที่สุดเท่ากับ 5,886 ดอลลาร์

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อมีข้อจำกัดที่เป็นสมการ และอสมการจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตปฏิบัติการ ให้ได้จุดเหมาะสมที่สอดคล้องกับข้อจำกัด



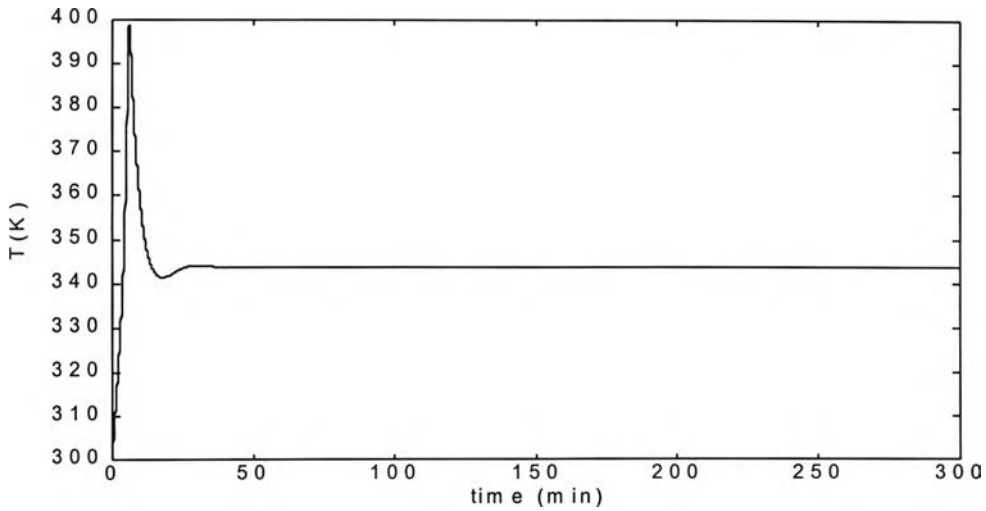
รูปที่ 5.5 ภาพสามมิติฟังก์ชันค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบ CSTR ที่มีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับกรณีปกติ

เมื่อพิสูจน์คำตอบจากตารางที่ 5.4 โดยการวาดกราฟสองมิติระหว่างปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิดังรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟข้อจำกัดทั้งที่เป็นสมการ และอสมการจะตัดกันที่จุด $V = 0.0387$ ลูกบาศก์เมตร และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 343.77 องศาเคลวิน มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณที่ใช้วิธีออปติไมซ์ทางคณิตศาสตร์ เมื่อ h1, h2 คือ สมการข้อจำกัดที่ 1 และ 2 ของสมการที่ (5.10) ซึ่งเป็นสมการสมดุลมวลสาร และ สมการสมดุลพลังงานตามลำดับ g1 คือ อสมการข้อจำกัดในสมการที่ (5.10) ซึ่งเป็นข้อจำกัดของอัตราการเปลี่ยนแปลงสารต้องมากกว่า 80 %



รูปที่ 5.6 แสดงผลการออปติไมซ์กรณีปกติของ CSTR ที่มีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ

เมื่อนำคำตอบที่ได้จากการทำออปติไมซ์สภาวะปกติไม่ทำซิมูเลชัน โดยใช้วิธีออย-เลอร์ (euler method) จะได้กราฟที่ 5.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ที่อุณหภูมิ 343.77 องศาเคลวิน



รูปที่ 5.7 การจำลองของกระบวนการ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ

5.3.2 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์ภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอน

จากผลออปติไมซ์ภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอนดังแสดงในตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าปริมาตรจากการออปติไมซ์วิธีนี้จะได้เท่ากับ 0.0481 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีขนาดน้อยกว่าการคำนวณโดยวิธีโอเวอร์ดีไซน์ที่คูณแฟกเตอร์ด้วย 1.3 เพิ่มเข้าไป ซึ่งได้ขนาดเครื่องปฏิกรณ์ตามวิธีโอเวอร์ดีไซน์มากกว่า ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกเกินความจำเป็น โดยปริมาตร 0.0481 ลูกบาศก์เมตรที่ได้จากการออปติไมซ์วิธีนี้จะสอดคล้องกับทุกข้อจำกัดของกระบวนการนี้ ตลอดทุกค่าของพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอนอยู่ในช่วง $\pm$ 10 %

5.3.3 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรมีความไม่แน่นอน

จากผลการออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรไม่แน่นอน ดังตารางที่ 5.4 โดยใช้ขั้นตอนออปติไมซ์ตามไดอะแกรมรูปที่ 5.3 จะได้ว่าขนาดเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 0.0428 ลูกบาศก์เมตร ค่าใช้จ่ายคาดหวังเท่ากับ 6,185 ดอลลาร์ และได้ช่วงของอุณหภูมิที่เป็นตัวแปรควบคุมของกระบวนการนี้เท่ากับ $341.87 \leq T \leq 346.98$ นอกจากนี้ยังทราบขอบเขตการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของอัตราการไหลเท่ากับ

$0.0027 \le q \le 0.0033$ และขอบเขตการเปลี่ยนแปลงสูงของอุณหภูมิของสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (T_i) ตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ขอบเขตของ T_i ที่ q^{q_1} ของจุดเหมาะสมของกรณีที่ตัวแปรมีความไม่แน่นอน

q_1	1	2	3	4	5
q^{q_1}	0.0027	0.0028	0.0030	0.0032	0.0033
$T_i^{L_{q_1}}$	294.0	294.0	294.0	294.0	294.0
$T_i^{U_{q_1}}$	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0

5.3.4 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน

ตามตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะได้เท่ากับ 0.0537 ลูกบาศก์เมตร โดยมีฟังก์ชันค่าใช้จ่ายเท่ากับ 6,903 ดอลลาร์ และทราบช่วงของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ $339.82 \le T \le 351.57$ ที่สามารถทำให้ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ได้ ภายในขอบเขตสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา และความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลง ± 10 % รวมทั้งอัตราการไหล และอุณหภูมิของสายที่ไหลเข้าถัง มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายในขอบเขตตามตารางที่ 5.6 โดยภายในช่วงนี้ที่สามารหาคำตอบที่เหมาะสมที่ทำให้สมการสมดุลมวลสาร และสมการสมดุลพลังงานเท่ากับศูนย์ นั้นคือระบบอยู่ในสภาวะคงที่ได้ และทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากกว่า 80 %

ตารางที่ 5.6 ขอบเขตของ T_i ที่ q^{q_1} ของจุดเหมาะสมของ
กรณีทั้งตัวแปรและพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน

q_1	1	2	3	4	5
q^{q_1}	0.0027	0.0028	0.0030	0.0032	0.0033
$T_i^{L_{q_1}}$	294.0	294.0	294.0	294.0	294.0
$T_i^{U_{q_1}}$	306.0	306.0	306.0	306.0	306.0

5.4 การเปรียบเทียบวิธีออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน

การออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนในกระบวนการนี้ จะกำหนดให้ตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิ และอัตราการไหลของสายป้อนมีความไม่แน่นอนเป็นแบบสโตแคสติก และกำหนดให้พารามิเตอร์ ได้แก่ ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา และสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยามีความไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก ซึ่งผลออปติไมซ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.4 ในข้างต้น

ในส่วนนี้จะออปติไมซ์กรณีทั้งตัวแปรและพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลออปติไมซ์ จากวิธีแบบดีเทอร์มินิสติก, วิธีสโตแคสติก และวิธีแบบผสม ดังนั้นการออปติไมซ์ในส่วนนี้ จะกำหนดให้มีความไม่แน่นอนทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน คือ ค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, สัมประสิทธิอัตราการเกิดปฏิกิริยา, อุณหภูมิของสายป้อน และอัตราการไหลของสายป้อน มีความไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติกทั้งหมดสำหรับกรณีออปติไมซ์แบบดีเทอร์มินิสติก และมีความไม่แน่นอนแบบสโตแคสติกทั้งหมด สำหรับกรณีออปติไมซ์แบบสโตแคสติก สุดท้ายให้ตัวแปรมีความสโตแคสติก และพารามิเตอร์ไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก สำหรับกรณีออปติไมซ์แบบผสม

5.4.1 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก

การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก คือให้ความไม่แน่นอนเป็นแบบดิสครีต มีค่าไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนที่มีความไม่แน่นอน 4 ตัวด้วยกัน คือ ค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา (ΔH), ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k), อัตราการไหล (q) และอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (T_i) โดยมีความคลาดเคลื่อน (deviation) จากค่าปกติดังนี้

$$-8800 \le \Delta H \le -7200 \tag{5.17}$$

$$1.062 \times 10^{7} \le k \le 1.298 \times 10^{7} \tag{5.18}$$

$$2.7 \times 10^{-3} \le q \le 3.3 \times 10^{-3} \tag{5.19}$$

$$294 \le T_i \le 306 \tag{5.20}$$

โดยมีค่าปกติตามที่แสดงในตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

สร้างภาพหาสถานการณ์ของความไม่แน่นอน 5 เหตุการณ์ อีกทั้งกำหนดแฟกเตอร์น้ำหนักหรือความน่าจะเป็นของโอกาสที่จะเกิดแต่ละสถานการณ์แสดงได้ตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 สถานการณ์ของความไม่แน่นอน

สถานการณ์	ความไม่แน่นอน				แฟกเตอร์น้ำหนัก
(p)	ΔH	k	q	T_i	(σ^p)
1	L	U	L	U	0.1
2	L	L	L	L	0.15
3	N	N	N	N	0.5
4	U	U	U	U	0.15
5	U	L	U	L	0.1

*L = ค่าขอบเขตล่าง (lower bound); U = ค่าขอบเขตบน (upper bound); N = ค่าปกติ (Normal value)

เมื่อใส่ความไม่แน่นอนทั้ง 5 สถานการณ์ เพื่อหาปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำให้กระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว และสอดคล้องกับข้อจำกัดของกระบวนการ ตลอดทุกสถานการณ์ของความไม่แน่นอน จะได้ดังสมการออปติไมซ์ที่ (5.21)

$$\min_{V,T^p,C_A^p} 30092.2(V^{0.54}) + \sum_{p=1}^{5}(1300q + 2T^p)$$

โดยมีเงื่อนไข

$$\frac{q^p}{V}(C_{Ai} - C_A^p) - k^p e^{-Ea/RT^p} C_A^p = 0$$

$$\frac{q^p}{V}(T_i^p - T^p) - \frac{\Delta H^p}{\rho Cp}(k^p e^{-Ea/RT^p} C_A^p) - \frac{UA}{\rho CpV}(T^p - T_c) = 0 \qquad (5.21)$$

$$0.8 - \frac{(C_{Ai} - C_A^p)}{C_{Ai}^p} \le 0$$

$$300 < T^p < 360$$

การแก้ปัญหาสมการที่ (5.21) จะใช้โปรแกรมออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก ซึ่งเป็นโปรแกรมเดียวกับกรณีออกแบบท่อในบทที่ 3 และกรณีออปติไมซ์ภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอน

5.4.2 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอนแบบสโตแคสติก

ความไม่แน่นอนแบบสโตแคสติก มีลักษณะเป็นตัวแปรเฟ้นสุ่มมีการกระจายแบบฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบต่อเนื่อง ส่วนความไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก มีลักษณะเป็นแบบดิสครีต

มีค่าชี้เฉพาะเจาะจง มีจำนวนจำกัด ซึ่งในส่วนนี้จะออปติไมซ์กรณีที่ทั้งตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอนแบบสโตแคสติก เพื่อเปรียบเทียบผลกับการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบผสมที่ให้ตัวแปรมีความไม่แน่นอนแบบฟังก์ชันต่อเนื่อง ส่วนพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอนแบบดิสครีต อีกทั้งเปรียบเทียบผลกับการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติกที่ให้ทั้งพารามิเตอร์และตัวแปรไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก

วิธีการออปติไมซ์แบบสโตแคสติก กำหนดให้ความไม่แน่นอนเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ที่มีลักษณะการกระจายแบบฟังก์ชันปกติ หรือเกาส์เซียน ซึ่งมีค่าปกติ และความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ลักษณะความไม่แน่นอนในวิธีแบบสโตแคสติก

ตัวแปรไม่แน่นอน	ฟังก์ชันการกระจาย	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนทางบวก	ค่าเบี่ยงเบนทางลบ
ΔH (kcal/kmol)	$N(-8000, 7.1\times10^{4})$	-8000	800	800
k (min^{-1})	$N(1.18\times10^{7}, 1.55\times10^{13})$	1.18×10^{7}	1.18×10^{6}	1.18×10^{6}
q (m^3/min)	$N(3\times10^{-3}, 1\times10^{-8})$	0.0030	0.0003	0.0003
T_i (K)	$N(300,4)$	300	6	6

การออปติไมซ์กระบวนการ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับภายใต้ความไม่แน่นอนกรณีพารามิเตอร์ และตัวแปรเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีการแจกแจงแบบปกติดังตารางที่ 5.8 สามารถเขียนอยู่ในรูปปัญหาออปติไมซ์แบบสโตแคสติก 2 ขั้นตอนได้ดังนี้

$$\min_{V} \; 30092.2(V^{0.54}) + \underset{\Delta H,k,q,T_i}{E}\left(\min_{T,C_A} 1300q + 2T\right)$$

โดยมีเงื่อนไข

$$\frac{q}{V}\left(C_{Ai} - C_A\right) - ke^{-Ea/RT}C_A = 0$$

$$\frac{q}{V}\left(T_i - T\right) - \frac{\Delta H}{\rho Cp}\left(ke^{-Ea/RT}C_A\right) - \frac{UA}{\rho CpV}\left(T - T_c\right) = 0 \qquad (5.22)$$

$$0.8 - \frac{(C_{Ai} - C_A)}{C_{Ai}} \le 0$$

$$300 < T < 360$$

$$\Delta H = N(-8000, 7.1\times10^{4}), \quad k = N(1.18\times10^{7}, 1.55\times10^{13}),$$

$$q = N(3\times10^{-3}, 1\times10^{-8}) \quad \text{และ} \quad T_i = N(300,4)$$

การแก้ปัญหา (5.22) สามารถใช้วิธีการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบสโตแคสติก

ตามที่ได้เสนอในบทที่ 3 แก้ปัญหาได้ เช่นเดียวกับการออกแบบระบบปรับเปลี่ยนเชิงเส้น และการออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรไม่แน่นอนที่ได้เสนอในข้างต้น

สำหรับการออปติไมซ์วิธีแบบผสมได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.2.4 ในข้างต้น ซึ่งจะนำผลจากการออปติไมซ์ทั้ง 3 วิธีมาเปรียบเทียบกัน โดยกำหนดให้มีความไม่แน่นอนทั้งหมด 4 ตัว คือ ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา, อัตราการไหล และอุณหภูมิของสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์

5.4.3 ผลการเปรียบเทียบวิธีออปติไมซ์

ผลการออปติไมซ์กระบวนการ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ ภายใต้ความไม่แน่นอนจากวิธีดีเทอร์มินิสติก, วิธีสโตแคสติก และวิธีผสม แสดงได้ดังตารางที่ 5.9 ซึ่งเป็นผลการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนกรณีมีความไม่แน่นอนทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน คือ ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา, อัตราการไหล และอุณหภูมิของสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 5.9 ผลการออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอนจากวิธีออปติไมซ์ต่าง ๆ

ตัวแปรตัดสินใจ	วิธีดีเทอร์มินิสติก	วิธีสโตแคสติก	วิธีผสม
$\overline{C}$ (\$)	6,934	6,672	6,903
V (m^3)	0.0543	0.0501	0.0537
T (K)	345.42	345.06	345.34
T^L (K)	341.06	340.53	339.82
T^U (K)	348.61	350.09	351.57
C_A ($kmol/m^3$)	2.112	2.309	2.178
C_A^L ($kmol/m^3$)	1.539	1.789	1.571
C_A^U ($kmol/m^3$)	3.000	3.000	3.000

จากตารางเปรียบเทียบผลการออปติไมซ์จากวิธีต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ จะมีขนาดแตกต่างกัน ทั้งนี้ เพราะ

1. ลักษณะความไม่แน่นอนที่ใส่ลงในสมการออปติไมซ์ที่แตกต่างกัน โดยวิธีดีเทอร์มินิสติก ให้ความไม่แน่นอนเป็นดิสครีต มีค่าชี้เฉพาะ กำหนดขอบเขตที่แน่ชัดของความไม่แน่นอน ส่วนวิธี

แบบสโตแคสติก ให้ความไม่แน่นอนเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง กำหนดค่าเฉลี่ย และความแปรปรวนของความไม่แน่นอน มิได้กำหนดขอบเขตของความไม่แน่นอน

2. วิธีดีเทอร์มินิสติก กำหนดแฟกเตอร์น้ำหนัก หรือความน่าจะเป็นของโอกาสที่เกิดของแต่ละเหตุการณ์ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้แฟกเตอร์น้ำหนักของโอกาสที่จะเกิดของสถานการณ์ที่ดีที่สุด และเลวที่สุดเท่ากับ 0.1 อาจมีแตกต่างความน่าจะเป็นของโอกาสที่เกิดขึ้นจากวิธีแบบสโตแคสติก จะมีความไม่แน่นอนแบบฟังก์ชันความน่าจะเป็นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งไม่สามารถหาค่าความน่าจะเป็นของโอกาสที่จะเกิดของความไม่แน่นอนที่จุดใด ๆ ได้ นั้นคือวิธีดีเทอร์มินิสติก กำหนดความน่าจะเป็นของโอกาสที่จะเกิดขึ้นของเหตุการณ์ที่ขอบเขตของความไม่แน่นอนความไม่แน่นอนเท่ากับ 0. 1 ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่ขอบเขตของความไม่แน่นอนจากวิธีสโตแคสติก

5.5 ผลวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

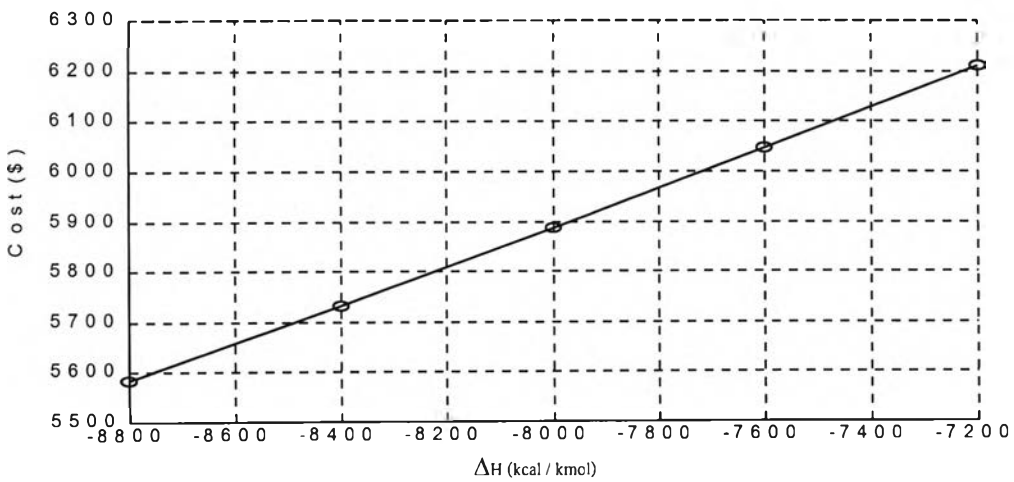
การวิเคราะห์ความไวเป็นการวิเคราะห์ที่ชี้ให้เห็นว่า ถ้ามีตัวแปรหรือพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนแปลง เช่น ค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา, อัตราการไหล หรืออุณหภูมิของสายป้อน โดยขณะที่ตัวหนึ่งเปลี่ยน ตัวแปรหรือพารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงที่ อยากทราบว่าค่าใช้จ่าย (ออปเจกทีฟฟังก์ชัน) ของกระบวนการจะเปลี่ยนไปอย่างไร ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นเท่าไร

วิธีการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ต่อออปเจกทีฟฟังก์ชันจะเริ่มจากการกำหนดให้พารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ เช่น สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดของปฏิกิริยา, ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, อัตราการไหล และอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงไปหลายอัตรา แต่ละค่าจะวิเคราะห์ว่า ถ้าตัวแปรหรือพารามิเตอร์เปลี่ยนเป็นอัตราเท่านี้ แล้วค่าใช้จ่ายจะเปลี่ยนเป็นจำนวนเท่าไร หนึ่งค่าจะได้ค่าใช้จ่ายหนึ่งจุด ทำอย่างนี้กับหลาย ๆ ค่าจะได้หลายจุด ลากต่อจุดเหล่านี้จะได้เส้นกราฟความไว สำหรับผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร และพารามิเตอร์ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลง -10%, -5%, +5% และ +10% ของค่าปกติ ของกรณีศึกษานี้แสดงดังนี้

1. กรณีค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา (ΔH) มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ
เมื่อค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง

ΔH (kcal/kmol)	V (m^3)	T (K)	COST ($)
- 8800	0.0346	346.0	5,585
- 8400	0.0365	344.9	5,733
- 8000	0.0387	343.8	5,886
- 7600	0.0409	342.7	6,046
- 7200	0.0433	341.5	6,211

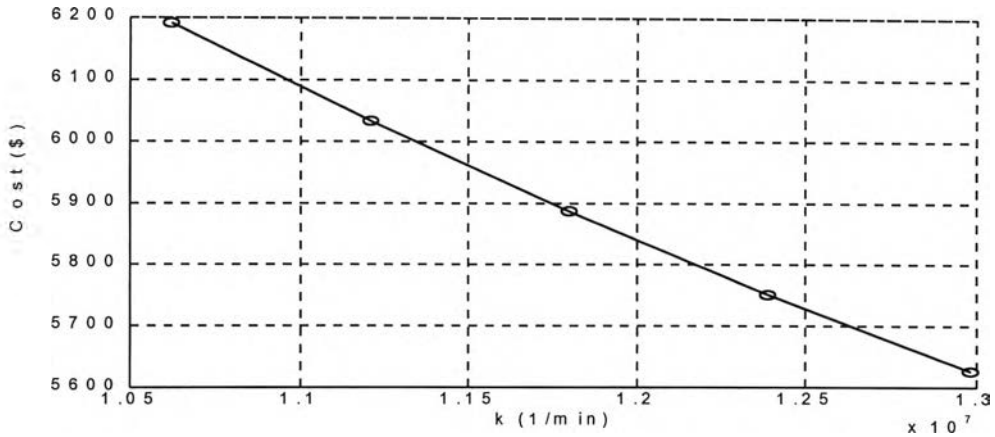


รูปที่ 5.8 เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ
เมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง

2. กรณีสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ
เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง

k (min^{-1})	V (m^3)	T (K)	COST ($)
10620000	0.043	343.8	6,191
11210000	0.0407	343.8	6,032
11800000	0.0387	343.8	5,886
12390000	0.0368	343.8	5,751
12980000	0.0351	343.8	5,626

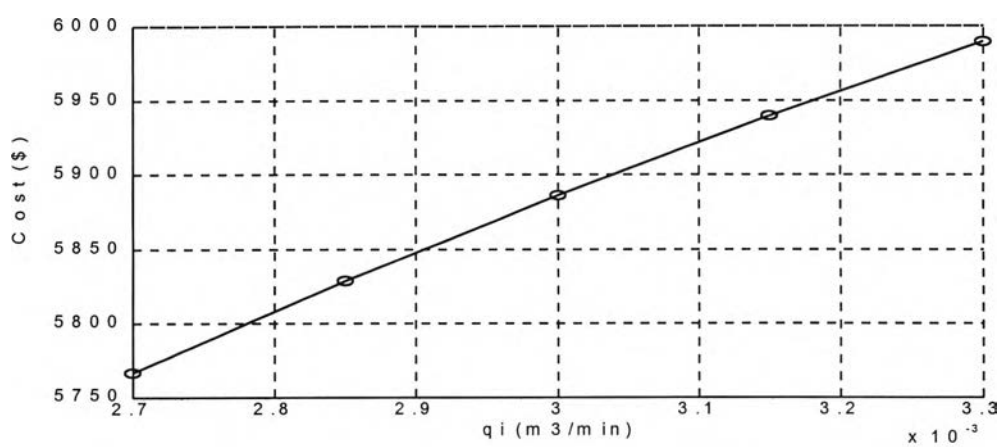


รูปที่ 5.9 เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ
เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง

3. กรณีอัตราการไหล (q) มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 5.12 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ
เมื่ออัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลง

q (m3/min)	V (m3)	T (K)	COST ($)
0.0027	0.0371	342.5	5,767
0.0028	0.0379	343.2	5,829
0.0030	0.0387	343.8	5,886
0.0032	0.0394	344.4	5,940
0.0033	0.0401	345.0	5,989

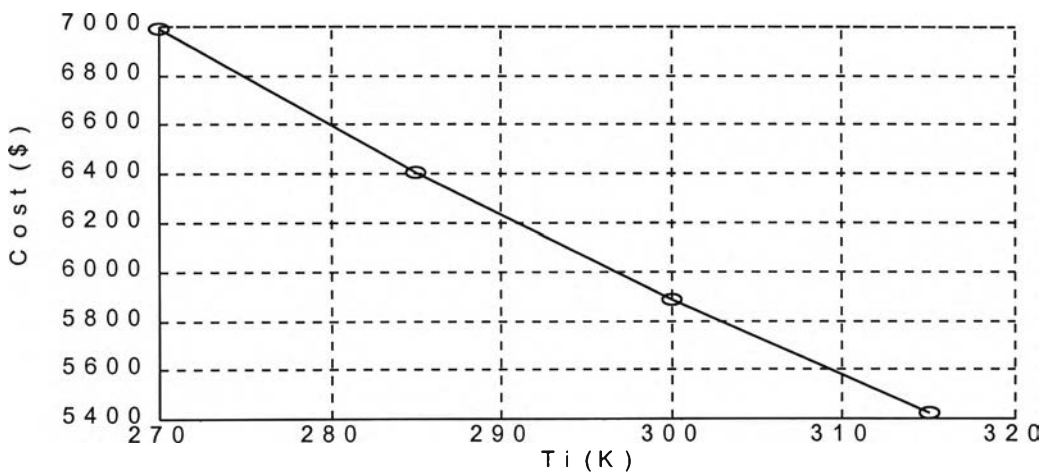


รูปที่ 5.10 เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ
เมื่ออัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลง

4. กรณีอุณหภูมิของสายป้อน (T_i) มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 5.13 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่ออุณหภูมิของสายป้อนมีการเปลี่ยนแปลง

T_i (K)	V (m3)	T (K)	COST ($)
270	0.0554	336.8	6,989
285	0.0462	340.3	6,405
300	0.0387	343.8	5,886
315	0.0325	347.2	5,425
330	ไม่มีคำตอบที่เหมาะสม		



รูปที่ 5.11 เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่ออุณหภูมิของสายป้อนมีการเปลี่ยนแปลง

จากกราฟวิเคราะห์ความไวรูปที่ 5.8 ถึง 5.11 จะเห็นได้ว่าระบบนี้มีความไวต่อความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา, สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา, อัตราการไหล และอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ โดยความไวของค่าใช้จ่ายดูได้จากความชันของกราฟ เส้นกราฟที่มีความชันมากหมายความว่าค่าความชันจะมีค่ามาก กล่าวคือตัวแปรเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยค่าใช้จ่ายจะเปลี่ยนไปอย่างมาก

ตารางที่ 5.14 ความชันของกราฟวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ

ตัวแปรเปลี่ยนแปลง	การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันค่าใช้จ่าย (ดอลลาร์)	ความชันของกราฟความไว (ดอลลาร์/เปอร์เซ็นต์)
ΔH	565	28.3
k	626	-31.3
q	222	11.1
T_i	1564	-104.2

จากตารางที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันค่าใช้จ่าย คือ ค่าผลต่างของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายกรณีที่ตัวแปรเปลี่ยนเปลงไป + 10% กับฟังก์ชันค่าใช้จ่ายกรณีที่ตัวแปรเปลี่ยนแปลงไป -10% โดยนำการเปลี่ยนแปลงของค่าใช้จ่ายที่ได้มาคำนวณความชันของกราฟ จะได้ว่ากราฟความไวของอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ความชันมากที่สุด แสดงว่ากระบวนการนี้มีความไวต่ออุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์มากที่สุด นอกจากนี้การวิเคราะห์ความไวยังช่วยให้ทราบว่า เมื่อตัวแปรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงแล้วมีผลต่อออปเจกทีฟฟังก์ชันที่ตั้งไว้มากหรือน้อยเพียงใด และทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มหรือลด

5.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีทำและผลการทดลองของการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ ในงานวิจัยนี้จะแบ่งชนิดของความไม่แน่นอนเป็น 2 ชนิดคือ พารามิเตอร์และตัวแปร โดยพารามิเตอร์ เช่น ค่าคงที่และอุณหพลศาสตร์, ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ จะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองจึงมีความไม่แน่นอนอยู่ในตัว ทราบค่าเป็นแบบขอบเขต จึงให้เป็นการกระจายแบบดิสครีต ส่วนตัวแปรส่วนใหญ่จะเป็นค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด ได้แก่ อัตราการไหล และอุณหภูมิ จะเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการแปรปรวน (fluctuation) ตลอดเวลามีกระจายแบบฟังก์ชันต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบปกติ การออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนจึงทำทั้งหมด 3 กรณี คือ ออปติไมซ์กรณีพารามิเตอร์ไม่แน่นอนใช้วิธีการค่าแบบดีเทอร์มินิสติก, ออปไมซ์กรณีตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน ใช้วิธีการหาค่าแบบสโตแคสติก และออปติไมซ์กรณีพารามิเตอร์และตัวแปรมีความไม่แน่นอนซึ่งใช้วิธีแบบรวมทั้งดีเทอร์มินิสติก และสโตแคสติกร่วมกัน นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาวิธีวิเคราะห์ความไว ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปร หรือพารามิเตอร์ต่อออปเจกทีฟฟังก์ชัน โดยกำหนดให้ตัวแปร หรือพารามิเตอร์

ตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนแปลง ขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ เพื่อคำนวณหาออปเจกทีฟฟังก์ชัน หรือฟังก์ชันค่าใช้จ่ายที่เปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์อาจกระทำในรูปเส้นกราฟความไว (sensitivity graph) ซึ่งสร้างจากค่าออปเจกทีฟฟังก์ชัน หรือฟังก์ชันค่าใช้จ่ายกับอัตราการเปลี่ยนแปลง -10%, -5%, 0%, +5% และ +10% หนึ่งค่าจะได้การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายหนึ่งจุด ทำอย่างนี้หลาย ๆ ค่า จะได้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายหลายจุด ลากต่อจุดเหล่านี้จะได้เส้นกราฟ แล้วพิจารณาค่าความชันของเส้นกราฟ ความชันของเส้นกราฟใดมาก แสดงว่าหากเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในตัวแปร เช่น ค่าคงที่ของปฏิกิริยาความร้อนจากปฏิกิริยา, สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา, อัตราการไหล และอุณหภูมิขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น จะทำให้ค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เช่นกัน

นอกจากนี้การเปรียบเทียบวิธีการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน แบบดีเทอร์มินิสติก, สโตแคสติก และแบบผสม โดยกำหนดให้ทั้งพารามิเตอร์ และตัวแปรมีความไม่แน่นอน นั้นคือมีความไม่แน่นอนทั้งสิ้น 4 ตัว ด้วยกัน คือ ค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา, อัตราการไหล และอุณหภูมิของสายป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ จะได้ว่าขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จากวิธีออปติไมซ์ต่างกัน จะมีค่าไม่เท่ากัน