

บทที่ 4

การออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ เพื่อดำเนินการหาตัวแปรออกแบบที่ทำให้ต้นทุนหลักในการผลิตรังผึ้งหม้อน้ำต่ำที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดและเงื่อนไขออกแบบและเงื่อนไขการทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์ที่กำหนด ซึ่งได้แก่ ขนาดของรังผึ้ง อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการและความดันลดของของไหลสูงสุดที่ยอมรับได้ และสภาวะที่ทำการทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์ เนื่องจากตัวแปรออกแบบประกอบด้วยจำนวนท่อ และขนาดของท่อและครีบ และสมการคณิตศาสตร์และความสัมพันธ์ต่างๆ เป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น จึงทำให้ปัญหาออปติไมซ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นแบบผสมจำนวนเต็ม

ในบทนี้เริ่มแรกจะกล่าวถึงรูปแบบและลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์ที่ศึกษา รูปแบบของปัญหาออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีไม่คำนึงถึงความไม่แน่นอนหรือกรณีออปติไมซ์ที่สภาวะปกติ และกรณีที่คำนึงถึงความไม่แน่นอน หรือกรณีออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน จากนั้นจะแสดงผลวิเคราะห์ความไวของความไม่แน่นอนและผลการออปติไมซ์ทั้ง 2 กรณี

4.1 รูปแบบและลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์ที่ศึกษา

หม้อน้ำรถยนต์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ หม้อน้ำที่ประกอบด้วยท่อ ครีบ และรังผึ้งที่มีรูปแบบและลักษณะต่างๆ ดังนี้

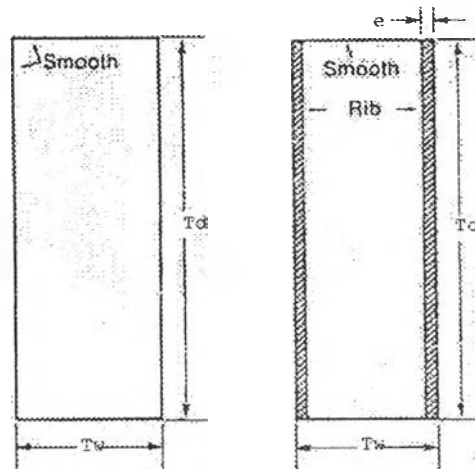
4.1.1 ท่อแบน

4.1.1.1 วัสดุที่ใช้ผลิตท่อ

- 1) ทองเหลือง (สำหรับรังผึ้งทองแดง-ทองเหลือง)
- 2) อะลูมิเนียม (สำหรับรังผึ้งอะลูมิเนียม)

4.1.1.2 ลักษณะของพื้นผิวภายในท่อ แสดงดังรูปที่ 4.1

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่พบความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนและความสัมพันธ์ของความเสียดทานของของไหลที่ไหลภายในท่อแบบ dimple ในงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาเฉพาะหม้อน้ำที่ประกอบด้วยท่อเรียบซึ่งมีผิวเรียบทั้งด้านความลึกและด้านความกว้างของท่อ และท่อแบบ rib ซึ่งมีผิวขรุขระด้านความลึกของท่อและผิวเรียบด้านความกว้างของท่อ เท่านั้น



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวภายในท่อที่ศึกษา

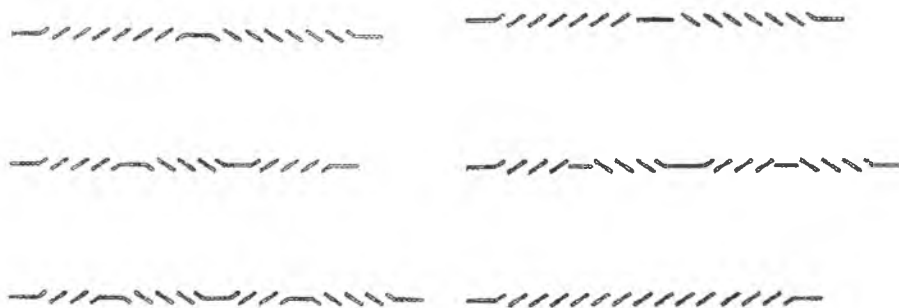
4.1.2 ครีบลูเวอร์

4.1.2.1 วัสดุที่ใช้ผลิตครีบลูเวอร์

- 1) ทองแดง (สำหรับรังผึ้งทองแดง-ทองเหลือง)
- 2) อะลูมิเนียม (สำหรับรังผึ้งอะลูมิเนียม)

4.1.2.2 ลักษณะของลูเวอร์

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาลูเวอร์ทั้ง 6 ลักษณะ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะของลูเวอร์ที่ศึกษา

4.1.3 ลักษณะการจัดวางท่อและครีบริงเป็นรังผึ้งหม่อนน้ำ

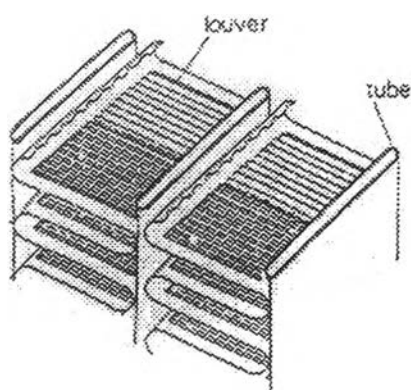
เนื่องจาก Achaichia และ Cowell (1988) ไม่ได้แสดงสมการคำนวณประสิทธิภาพของครีบริงลูเวอร์สำหรับลักษณะการจัดวางท่อและครีบริงเป็นรังผึ้งแบบครีบริงลูเวอร์แผ่นไว้ ในงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาเฉพาะหม่อนน้ำที่มีลักษณะการจัดวางท่อและครีบริงเป็นรังผึ้ง 2 แบบ คือ

4.1.3.1 แบบครีบริงลูเวอร์พับงอ (louvered corrugated fin) (Webb และคณะ, 1995)

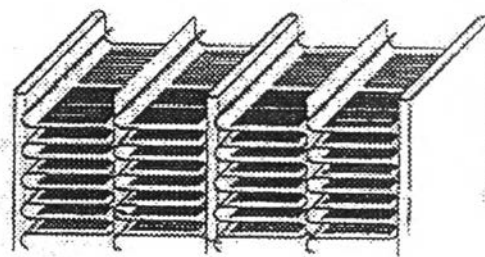
แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก)

4.1.3.2 แบบครีบริงลูเวอร์พับงอที่มีแผ่นกั้น (louvered corrugated fin with splitter plate)

(Chang และ Wang, 1996; 1997) แสดงดังรูปที่ 4.3 (ข)



(ก) แบบครีบริงลูเวอร์พับงอ



(ข) แบบครีบริงลูเวอร์พับงอที่มีแผ่นกั้น

รูปที่ 4.3 ลักษณะการจัดวางท่อและครีบริงเป็นรังผึ้งหม่อนน้ำที่ศึกษา

สำหรับรูปแบบของหม่อนน้ำรถยนต์ที่ศึกษานั้นจะมีทั้งหมด 8 แบบ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รูปแบบหม้อนํ้ารถยนต์ที่ศึกษา

หม้อนํ้าแบบที่	รังผึ้ง	ลักษณะของรังผึ้ง	ท่อ
1	ทองแดง-ทองเหลือง	แบบที่ 1	ท่อเรียบ
2	อะลูมิเนียม	แบบที่ 1	ท่อเรียบ
3	ทองแดง-ทองเหลือง	แบบที่ 1	ท่อแบบ rib
4	อะลูมิเนียม	แบบที่ 1	ท่อแบบ rib
5	ทองแดง-ทองเหลือง	แบบที่ 2	ท่อเรียบ
6	อะลูมิเนียม	แบบที่ 2	ท่อเรียบ
7	ทองแดง-ทองเหลือง	แบบที่ 2	ท่อแบบ rib
8	อะลูมิเนียม	แบบที่ 2	ท่อแบบ rib

* รังผึ้งแบบที่ 1 คือ แบบครีบลูเวอร์พับงอ และรังผึ้งแบบที่ 2 คือ แบบครีบลูเวอร์พับงอที่มีแผ่นกัน

4.2 รูปแบบปัญหาออปติไมซ์หม้อนํ้ารถยนต์

จากทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและกลศาสตร์ของไหลสามารถเขียนรูปแบบปัญหาออปติไมซ์หม้อนํ้ารถยนต์ ในกรณีที่ต้องการมินิไมซ์ค่าวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตรังผึ้งหม้อนํ้าได้จาก

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ : } \min_d C \quad (4.1)$$

โดยที่

C คือ ค่าใช้จ่ายหรือค่าวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตรังผึ้งหม้อนํ้า

d คือ ตัวแปรออกแบบ ประกอบด้วย ความกว้างของท่อ ความลึกของท่อ จำนวนท่อ ระยะห่างระหว่างครีบ ความยาวของครีบ ระยะห่างระหว่างลูเวอร์ ความยาวของลูเวอร์ มุมของลูเวอร์ และความสูงและระยะห่างของความขรุขระ (สำหรับกรณีที่ใช้ท่อแบบ rib)

สำหรับค่าใช้จ่ายหรือค่าวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตรังผึ้งแบบครีบลูเวอร์พับงอและรังผึ้งแบบครีบลูเวอร์พับงอที่มีแผ่นกัน คำนวณได้จากสมการ (4.2 ก) และ (4.2 ข) ตามลำดับ

$$C = (C_{fin} \times A_{fin}) + (C_{tube} \times A_{tube}) \quad (4.2 \text{ ก})$$

$$C = (C_{fin} \times A_{fin}) + (C_{tube} \times A_{tube}) + (C_{sp} \times A_{sp}) \quad (4.2 \text{ ข})$$

โดยที่

C_{fin} คือ ราคาของวัสดุที่ใช้ผลิตครีบท่อหน่วยพื้นที่

C_{tube} คือ ราคาของวัสดุที่ใช้ผลิตท่อต่อหน่วยพื้นที่

C_{strip} คือ ราคาของวัสดุที่ใช้ผลิตแผ่นกั้นต่อหน่วยพื้นที่

A_{fin} คือ พื้นที่ของครีบท่อ คำนวณได้จาก

$$A_{fin} = [(2F_p - 2F_t) + 4(F_t - F_d)]F_d \quad (4.3)$$

A_{tube} คือ พื้นที่ของท่อ คำนวณได้จาก

$$A_{tube} = 2N_t T_t [(T_d - 2T_t) + (T_w - 2T_t)] \quad (4.4)$$

A_{sp} คือ พื้นที่ของแผ่นกั้น คำนวณได้จาก

$$A_{sp} = H \times D \times (N_t - 1) \quad (4.5)$$

และมีข้อจำกัดที่เป็นสมการแสดงดังตารางที่ 4.2 และข้อจำกัดที่เป็นสมการแสดงดัง
ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ข้อจำกัดที่เป็นสมการ

ตัวแปร	คำอธิบาย	สมการที่ใช้คำนวณ
$D_{h,a}$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของรังผึ้ง	2.85
$D_{h,w}$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ	2.71
$D_{l,w}$	เส้นผ่านศูนย์กลางลามินาร์ของท่อ	2.70
A_{pr}	พื้นที่ผิวของท่อที่สัมผัสกับอากาศ	2.54
A_{sc}	พื้นที่ผิวของครีปที่สัมผัสกับอากาศ	2.58
A_a	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของอากาศ	2.53
A_w	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของน้ำ	2.60
A_{wall}	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของท่อ	2.61
η_f	ประสิทธิภาพของครีป	2.22
h_a	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ	2.86
h_w	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำที่ไหลภายในท่อแบน	2.72, 2.78
$U_m A$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์	2.33
ΔT_m	ความแตกต่างของอุณหภูมิของไหล	2.36
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์	2.43
f_a	แฟกเตอร์ความเสียดทานของอากาศ	2.81
$K_{c,a}, K_{e,a}$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดและขยาย ขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของอากาศ	2.89, 2.90
$A_{ff,a}$	พื้นที่ที่น้อยที่สุดของการไหลของอากาศ	2.64
ΔP_a	ความดันลดของอากาศ	2.47
f_w	แฟกเตอร์ความเสียดทานของน้ำที่ไหลภายในท่อแบน	2.6, 2.74
$K_{c,w}, K_{e,w}$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดและขยาย ขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำ	2.87, 2.88
$K_{tank,w}$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานภายในถังน้ำ	3.14
$A_{ff,w}$	พื้นที่ที่น้อยที่สุดของการไหลของน้ำ	2.63
ΔP_w	ความดันลดของน้ำ	3.19

ตารางที่ 4.3 ข้อจำกัดที่เป็นสมการ

สำหรับ	ข้อจำกัดที่เป็นสมการ
การจัดวางท่อและครีปเป็นรังผึ้ง	$F_l - L_l \geq 1 \times 10^{-3}$
	$100 \leq Re_{L_p} \leq 3 \times 10^3$
กรณีที่ใช้ท่อเรียบ	$4 \times 10^3 \leq Re_{D_h} \leq 5 \times 10^5$
กรณีที่ใช้ท่อแบบ rib	$e^+ \geq 30$
	$10 \leq \frac{P}{e} \leq 40$
	$0.01 \leq \frac{e}{D_h} \leq 0.04$
ความดันลดในหม้อน้ำรถยนต์ที่ยอมรับได้	$\Delta P_w \leq \Delta P_{w,max}$
	$\Delta P_a \leq \Delta P_{a,max}$

นอกจากนี้ ในการออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์จะต้องกำหนดค่าเฉพาะให้กับตัวแปรต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสมภาวะที่ทำการทดสอบ ความต้องการของลูกค้ำ และวัสดุที่เลือกใช้ในการผลิตท่อและครีป และต้องกำหนดค่าขอบเขตให้กับตัวแปรออกแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต แสดงตัวแปรที่ต้องกำหนดค่าเฉพาะและค่าขอบเขต ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรที่ต้องกำหนดค่าเฉพาะ

ตัวแปร	คำอธิบาย
$T_{w,1}, T_{a,1}$	อุณหภูมิขาเข้าของน้ำและอากาศ ¹
$Q_{required}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการ ²
V_w	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ ¹
$u_{fr,a}$	ความเร็วลมด้านหน้ารังผึ้ง ¹
$\Delta P_{w,max}$	ความดันลดของน้ำสูงสุดที่ยอมรับได้ ²
$\Delta P_{a,max}$	ความดันลดของอากาศสูงสุดที่ยอมรับได้ ²
H	ความสูงของรังผึ้งหม้อน้ำ ²
W	ความกว้างของรังผึ้งหม้อน้ำ ²
D	ความลึกของรังผึ้งหม้อน้ำ ²
F_l	ความหนาของครีป ³
T_l	ความหนาของท่อ ³

1. ขึ้นอยู่กับสมภาวะที่ทำการทดสอบ 2. ขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้ำ 3. ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้ในการผลิต

ตารางที่ 4.5 ตัวแปรที่ต้องกำหนดค่าขอบเขต

ตัวแปร	คำอธิบาย
F_p	ระยะห่างระหว่างครีป
F_l	ความยาวของครีป
L_p	ระยะห่างระหว่างลูเวอร์
L_l	ความยาวของลูเวอร์
L_θ	มุมของลูเวอร์
T_w	ความกว้างของท่อ
T_d	ความลึกของท่อ
e	ความสูงของความขรุขระ ¹
p	ระยะห่างของความขรุขระ ¹

1. เฉพาะท่อแบบ rib

งานวิจัยนี้จะแบ่งการออกแบบตีไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ ออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีออกแบบตีไมซ์ที่สภาวะปกติ หรือกรณีที่พิจารณาว่าสมการที่ใช้ในการออกแบบมีความถูกต้องยอมรับได้ และกรณีออกแบบตีไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนซึ่งจะคำนึงถึงความไม่แน่นอนของสมการที่ใช้ในการออกแบบ โดยที่การออกแบบตีไมซ์ทั้ง 2 กรณีจะศึกษาผลการออกแบบตีไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ เมื่อกำหนดข้อกำหนดดังตารางที่ 4.6 กำหนดค่าเฉพาะดังตารางที่ 4.7 และกำหนดค่าขอบเขตดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 ข้อกำหนดสำหรับกรณีศึกษา

ข้อกำหนดที่	H (เมตร)	W (เมตร)	D (เมตร)	$Q_{required}$ (กิโลวัตต์)	$\Delta P_{a,max}$ (ปาสคาล)	$\Delta P_{w,max}$ (กิโลปาสคาล)
1	0.325	0.671	0.016	34.64	140	6.4
2	0.425	0.710	0.016	45.84	170	5.8
3	0.350	0.671	0.016	39.50	190	5.0
4	0.375	0.572	0.016	37.17	230	5.3
5	0.350	0.652	0.016	36.42	220	3.0
6	0.400	0.715	0.016	49.68	170	5.1
7	0.375	0.681	0.016	45.63	170	6.0
8	0.375	0.681	0.016	40.28	140	4.8
9	0.390	0.639	0.024	48.33	250	4.7
10	0.500	0.688	0.024	60.36	250	3.5

ตารางที่ 4.7 ตัวแปรที่กำหนดค่าเฉพาะสำหรับกรณีศึกษา

ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าที่กำหนด	หน่วย
$T_{w,1}$	อุณหภูมิขาเข้าของน้ำ	90	องศาเซลเซียส
$T_{a,1}$	อุณหภูมิขาเข้าของอากาศ	32	องศาเซลเซียส
V_w	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ	6.67×10^{-4}	ลบ.ม./ วินาที
$u_{fr,a}$	ความเร็วลมด้านหน้ารั้งฝั่ง	8	เมตร/ วินาที
F_t	ความหนาของครีบทองแดง	4.5×10^{-5}	เมตร
	ความหนาของครีบอะลูมิเนียม	8.0×10^{-5}	เมตร
T_t	ความหนาของท่อทองเหลือง	1.10×10^{-4}	เมตร
	ความหนาของท่ออะลูมิเนียม	2.65×10^{-4}	เมตร
S_t	ความหนาของแผ่นกั้นทองแดง	5.08×10^{-5}	เมตร
	ความหนาของแผ่นกั้นอะลูมิเนียม	5.08×10^{-5}	เมตร
C_{fin}	ราคาของครีบทองแดง	52.0	บาท/ ตร.ม.
	ราคาของครีบอะลูมิเนียม	31.8	บาท/ ตร.ม.
C_{tube}	ราคาของท่อทองเหลือง	115.3	บาท/ ตร.ม.
	ราคาของท่ออะลูมิเนียม	105.5	บาท/ ตร.ม.
C_{sp}	ราคาของแผ่นกั้นทองแดง	58.7	บาท/ ตร.ม.
	ราคาของแผ่นกั้นอะลูมิเนียม	20.2	บาท/ ตร.ม.

ตารางที่ 4.8 ตัวแปรที่กำหนดค่าขอบเขตสำหรับกรณีศึกษา

ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าขอบเขต		หน่วย
		ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน	
F_p	ระยะห่างระหว่างครีบ	5×10^{-4}	2×10^{-3}	เมตร
F_t	ความยาวของครีบ	5×10^{-3}	1×10^{-2}	เมตร
L_p	ระยะห่างระหว่างลูเวอร์	1×10^{-3}	1×10^{-2}	เมตร
L_t	ความยาวของลูเวอร์	5×10^{-3}	1×10^{-2}	เมตร
L_θ	มุมของลูเวอร์	20	30	องศา

ตารางที่ 4.8 ตัวแปรที่กำหนดค่าขอบเขตสำหรับกรณีศึกษา (ต่อ)

ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าขอบเขต		หน่วย
		ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน	
T_w	ความกว้างของท่อ	1×10^{-3}	1×10^{-2}	เมตร
T_d	ความลึกของท่อ	1×10^{-2}	0.016	เมตร
e	ความสูงของความขรุขระ	1×10^{-4}	2.5×10^{-4}	เมตร
p	ระยะห่างของความขรุขระ	1×10^{-3}	1×10^{-2}	เมตร

4.2.1 กรณีออปติไมซ์ที่สภาวะปกติ

การออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ที่สภาวะปกติ หรือกรณีที่พิจารณาว่าสมการที่ใช้ในการออกแบบมีความถูกต้อง 100% สามารถเขียนรูปแบบปัญหาออปติไมซ์ในกรณีที่ต้องการมินิไมซ์ค่าวัตถุบหลักที่ใช้ในการผลิตถังฝั่งหม้อน้ำรถยนต์ได้ดังสมการ

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์:} \quad \min C \quad (4.6)$$

โดยมีข้อจำกัดที่เป็นสมการและอสมการดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ทั้งนี้จะต้องเลือกข้อจำกัดให้สอดคล้องกับรูปแบบและลักษณะต่างๆ ของหม้อน้ำรถยนต์ และกำหนดค่าเฉพาะและค่าขอบเขตดังตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

4.2.2 กรณีออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน

การออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอนจะคำนึงถึงความไม่แน่นอนของสมการที่ใช้ในการออกแบบหรือสมการที่ใช้ในการคำนวณคุณลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์ ซึ่งได้แก่ สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลด และเนื่องสามารถกำหนดขอบเขตของความไม่แน่นอนได้จากผลการทดสอบความถูกต้องของสมการในบทที่ 3 จึงสามารถแก้ปัญหาออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนนี้ด้วยการหาค่าคำตอบแบบดีเทอร์มินิสติก

ขั้นแรกของการหาค่าคำตอบแบบดิเทอร์มินิสติก คือ การกำหนดพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน และสร้างภาพสถานการณ์ที่ทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่าน้อยที่สุด (สถานการณ์ที่ดีที่สุด) สถานการณ์ปกติ และสถานการณ์ที่ทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่ามากที่สุด แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของของไหลของหม้อน้ำรถยนต์มีหลายตัว และไม่ทราบผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวต่อฟังก์ชันค่าใช้จ่ายที่แน่ชัด จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ต่อฟังก์ชันค่าใช้จ่าย ก่อนที่จะกำหนดพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน และกำหนดแฟกเตอร์น้ำหนักของแต่ละสถานการณ์ให้กับพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน

จากผลวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ (รายละเอียดจะแสดงในหัวข้อ (4.5)) พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อฟังก์ชันค่าใช้จ่ายซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล และแฟกเตอร์ความเสียหายของของไหล โดยที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศ และแฟกเตอร์ความเสียหายของน้ำจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายลดลง เมื่อพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าปกติที่ได้จากการคำนวณ ในขณะที่แฟกเตอร์ความเสียหายของอากาศจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

ในการคำนวณนี้จะกำหนดให้พารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอนมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าปกติที่ได้จากการคำนวณ $\pm 15\%$ และกำหนดแฟกเตอร์น้ำหนักของสถานการณ์ที่ดีที่สุด สถานการณ์ปกติ และสถานการณ์ที่แย่ที่สุด ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน

พารามิเตอร์ ที่มีความไม่แน่นอน	ที่สถานการณ์ปกติ คำนวณจากสมการ	% ความคลาดเคลื่อนของ พารามิเตอร์ของแต่ละสถานการณ์			แฟกเตอร์น้ำหนัก ของแต่ละสถานการณ์		
		ดีที่สุด	ปกติ	แย่ที่สุด	ดีที่สุด	ปกติ	แย่ที่สุด
h_w	2.72, 2.78	+ 15%	0 %	- 15%	0.1	0.8	0.1
h_a	2.86	+ 15%	0 %	- 15%	0.1	0.8	0.1
f_w	2.6, 2.74	+ 15%	0 %	- 15%	0.1	0.8	0.1
f_a	2.81	- 15%	0 %	+ 15%	0.1	0.8	0.1

นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{สถานการณ์ที่ดีที่สุด} & \quad \theta^1 = \{h_w^U, h_a^U, f_w^U, f_a^L\}, & \sigma^1 &= 0.1 \\ \text{สถานการณ์ปกติ} & \quad \theta^2 = \{h_w^N, h_a^N, f_w^N, f_a^N\}, & \sigma^2 &= 0.8 \\ \text{สถานการณ์ที่แย่ที่สุด} & \quad \theta^3 = \{h_w^L, h_a^L, f_w^L, f_a^U\}, & \sigma^3 &= 0.1 \end{aligned}$$

เมื่อ

$\theta^1, \theta^2, \theta^3$ คือ ความไม่แน่นอนสำหรับสถานการณ์ที่ดีที่สุด ปกติ และแย่ที่สุด ตามลำดับ
 $\sigma^1, \sigma^2, \sigma^3$ คือ แฟกเตอร์น้ำหนักหรือความน่าจะเป็นของโอกาสที่จะเกิดของสถานการณ์ที่ดีที่สุด ปกติ และแย่ที่สุด ตามลำดับ

โดยที่ พารามิเตอร์แต่ละตัวคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} h_w^U &= 1.15 h_w^N & h_w^L &= 0.85 h_w^N \\ h_a^U &= 1.15 h_a^N & h_a^L &= 0.85 h_a^N \\ f_w^U &= 1.15 f_w^N & f_w^L &= 0.85 f_w^N \\ f_a^U &= 0.85 f_a^N & f_a^L &= 1.15 f_a^N \end{aligned}$$

การออกแบบหม้อน้ำรถยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอน สามารถเขียนรูปแบบปัญหาการออกแบบในกรณีที่ต้องการมินิไมซ์ค่าวัตถุประสงค์หลักที่ใช้ในการผลิตถังหม้อน้ำรถยนต์ได้ดังสมการ

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ :} \quad \min C \quad (4.7)$$

โดยมีข้อจำกัดที่เป็นสมการ และข้อจำกัดที่เป็นสมการแสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ข้อกำหนดที่เป็นสมการสำหรับการออกแบบไมซ์หม้อน้ำรยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอน

สำหรับ	ข้อกำหนดที่เป็นสมการ
การจัดวางท่อและครีปเป็นรังผึ้ง	$F_l - L_l \geq 1 \times 10^{-3}$
	$100 \leq Re_{L_p} \leq 3 \times 10^3$
กรณีที่ใช้ท่อเรียบ	$4 \times 10^3 \leq Re_{D_h} \leq 5 \times 10^5$
กรณีที่ใช้ท่อแบบ rib	$(e^+)^p \geq 30$
	$10 \leq \frac{p}{e} \leq 40$
	$0.01 \leq \frac{e}{D_h} \leq 0.04$
ความดันลดในหม้อน้ำรยนต์ที่ยอมรับได้	$\Delta P_w^p \leq \Delta P_{w,max}$
	$\Delta P_a^p \leq \Delta P_{a,max}$

เมื่อ

ΔP_a^p และ ΔP_w^p คือ ค่าความดันลดของอากาศและน้ำของแต่ละสถานการณ์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ข้อกำหนดที่เป็นสมการสำหรับการออกแบบไมซ์หม้อน้ำรยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอน

ตัวแปร	คำอธิบาย	สมการที่ใช้คำนวณ
$D_{h,a}$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของรังผึ้ง	2.85
$D_{h,w}$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ	2.71
$D_{l,w}$	เส้นผ่านศูนย์กลางลามินาร์ของท่อ	2.70
A_{pr}	พื้นที่ผิวของท่อที่สัมผัสกับอากาศ	2.54
A_{sc}	พื้นที่ผิวของครีปที่สัมผัสกับอากาศ	2.58
A_a	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของอากาศ	2.53
A_w	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของน้ำ	2.60
A_{wall}	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของท่อ	2.61
η_f	ประสิทธิภาพของครีป	2.22
h_a	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ	2.86
h_w	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำที่ไหลภายในท่อแบบ	2.72, 2.78

ตารางที่ 4.11 ข้อจำกัดที่เป็นสมการสำหรับการออกแบบไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอน (ต่อ)

ตัวแปร	คำอธิบาย	สมการที่ใช้คำนวณ
$U_m A$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์	$U_m A = \sum_{p=1}^3 \sigma^p (U_m A)^p$
ΔT_m	ความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหล	2.36
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์	2.43
f_a	แฟกเตอร์ความเสียดทานของอากาศ	2.81
$K_{c,a}, K_{e,a}$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดและขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของอากาศ	2.89, 2.90
$A_{ff,a}$	พื้นที่ที่น้อยที่สุดของการไหลของอากาศ	2.64
ΔP_a	ความดันลดของอากาศ	2.47
f_w	แฟกเตอร์ความเสียดทานของน้ำที่ไหลภายในท่อแบน	2.6, 2.74
$K_{c,w}, K_{e,w}$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดและขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำ	2.87, 2.88
$K_{tank,w}$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานภายในถังน้ำ	3.14
$A_{ff,w}$	พื้นที่ที่น้อยที่สุดของการไหลของน้ำ	2.63
ΔP_w	ความดันลดของน้ำ	3.19

* คำนวณทั้ง 3 สถานการณ์

เมื่อ

σ^p คือ แฟกเตอร์น้ำหนักของแต่ละสถานการณ์

$(U_m A)^p$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($U_m A$) ของหม้อน้ำรถยนต์ของแต่ละสถานการณ์

ทั้งนี้จะต้องเลือกข้อจำกัดให้สอดคล้องกับรูปแบบและลักษณะต่างๆ ของหม้อน้ำรถยนต์ และกำหนดค่าเฉพาะและค่าขอบเขตดังตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

4.3 ผลการขอปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์

ผลการขอปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ที่สภาวะปกติ และผลการขอปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอน แสดงดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

ข้อกำหนด	รูปแบบหม้อน้ำ	Fp (เมตร)	Fl (เมตร)	Lp (เมตร)	Ll (เมตร)	La (องศา)	Td (เมตร)	Tw (เมตร)	Nt (ท่อ)	e (เมตร)	p (เมตร)	C (บาท)
1	1	0.0017	0.0084	0.0010	0.0074	30.0	0.0100	0.0019	66	-	-	147.2
	2	0.0016	0.0088	0.0010	0.0078	30.0	0.0100	0.0023	61	-	-	106.1
	3	0.0014	0.0085	0.0015	0.0053	30.0	0.0108	0.0028	60	0.00017	0.0024	159.6
	4	0.0015	0.0098	0.0015	0.0073	30.0	0.0134	0.0030	53	0.00017	0.0022	117.6
	5	0.0014	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0100	0.0024	46	-	-	154.7
	6	0.0013	0.0071	0.0010	0.0061	30.0	0.0100	0.0030	40	-	-	105.3
	7	0.0016	0.0067	0.0010	0.0057	30.0	0.0100	0.0037	40	0.00015	0.0015	136.0
	8	0.0015	0.0076	0.0010	0.0066	30.0	0.0100	0.0043	35	0.00015	0.0017	93.1
2	1	0.0016	0.0082	0.0010	0.0072	30.0	0.0100	0.0019	71	-	-	207.5
	2	0.0015	0.0100	0.0010	0.0090	30.0	0.0100	0.0025	58	-	-	148.1
	3	0.0016	0.0088	0.0015	0.0075	30.0	0.0100	0.0030	61	0.00017	0.0024	191.7
	4	0.0017	0.0093	0.0010	0.0083	30.0	0.0105	0.0033	57	0.00018	0.0029	135.5
	5	0.0014	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0100	0.0023	49	-	-	218.5
	6	0.0013	0.0070	0.0010	0.0060	30.0	0.0100	0.0029	43	-	-	148.6
	7	0.0015	0.0069	0.0010	0.0059	30.0	0.0100	0.0038	41	0.00016	0.0016	189.8
	8	0.0014	0.0081	0.0010	0.0071	30.0	0.0100	0.0045	35	0.00015	0.0015	129.8
3	1	0.0015	0.0079	0.0010	0.0069	30.0	0.0100	0.0018	70	-	-	173.0
	2	0.0013	0.0093	0.0010	0.0083	30.0	0.0100	0.0024	58	-	-	123.0
	3	0.0016	0.0081	0.0012	0.0071	30.0	0.0100	0.0029	62	0.00017	0.0024	154.3
	4	0.0016	0.0089	0.0010	0.0079	30.0	0.0101	0.0032	56	0.00017	0.0034	110.9
	5	0.0013	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0104	0.0022	48	-	-	185.2
	6	0.0012	0.0065	0.0010	0.0055	30.0	0.0100	0.0028	43	-	-	124.7
	7	0.0014	0.0067	0.0010	0.0057	30.0	0.0100	0.0037	40	0.00015	0.0015	158.8
	8	0.0013	0.0076	0.0010	0.0066	30.0	0.0100	0.0044	35	0.00015	0.0015	108.3
4	1	0.0014	0.0075	0.0010	0.0065	30.0	0.0100	0.0021	60	-	-	160.1
	2	0.0013	0.0091	0.0010	0.0081	30.0	0.0100	0.0028	49	-	-	114.3
	3	0.0015	0.0078	0.0010	0.0068	30.0	0.0101	0.0031	53	0.00018	0.0039	142.3
	4	0.0015	0.0086	0.0010	0.0076	30.0	0.0102	0.0035	48	0.00018	0.0053	104.2
	5	0.0012	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0109	0.0026	40	-	-	174.8
	6	0.0011	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0100	0.0033	37	-	-	117.3
	7	0.0013	0.0064	0.0010	0.0054	30.0	0.0100	0.0044	34	0.00016	0.0016	149.6
	8	0.0012	0.0072	0.0010	0.0062	30.0	0.0100	0.0051	30	0.00015	0.0015	102.3

ข้อกำหนด	รูปแบบ หมอนน้ำ	Fp (เมตร)	Fl (เมตร)	Lp (เมตร)	Ll (เมตร)	La (องศา)	Td (เมตร)	Tw (เมตร)	Nt (ฟุต)	e (เมตร)	p (เมตร)	C (บาท)
5	1	0.0015	0.0078	0.0010	0.0068	30.0	0.0100	0.0022	66	-	-	160.7
	2	0.0014	0.0092	0.0010	0.0082	30.0	0.0100	0.0028	55	-	-	115.4
	3	0.0017	0.0082	0.0010	0.0072	30.0	0.0104	0.0034	57	0.00019	0.0029	142.4
	4	0.0016	0.0094	0.0010	0.0084	30.0	0.0100	0.0038	50	0.00020	0.0048	102.9
	5	0.0013	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0102	0.0028	45	-	-	173.3
	6	0.0012	0.0064	0.0010	0.0054	30.0	0.0100	0.0034	41	-	-	118.0
	7	0.0014	0.0065	0.0010	0.0055	30.0	0.0100	0.0045	38	0.00017	0.0017	148.3
	8	0.0013	0.0075	0.0010	0.0065	30.0	0.0100	0.0052	33	0.00017	0.0017	102.0
6	1	0.0013	0.0076	0.0010	0.0066	30.0	0.0100	0.0017	78	-	-	233.6
	2	0.0013	0.0067	0.0012	0.0057	30.0	0.0100	0.0020	83	-	-	172.3
	3	0.0010	0.0090	0.0015	0.0050	30.0	0.0129	0.0026	62	0.00017	0.0019	268.3
	4	0.0012	0.0090	0.0015	0.0064	30.0	0.0136	0.0027	62	0.00018	0.0035	179.5
	5	0.0011	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0022	51	-	-	251.1
	6	0.0010	0.0061	0.0010	0.0051	30.0	0.0100	0.0026	49	-	-	168.8
	7	0.0011	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0022	51	0.00017	0.0019	251.1
	8	0.0012	0.0066	0.0010	0.0056	30.0	0.0100	0.0038	43	0.00016	0.0025	143.8
7	1	0.0013	0.0075	0.0010	0.0065	30.0	0.0100	0.0017	75	-	-	207.7
	2	0.0013	0.0067	0.0012	0.0057	30.0	0.0100	0.0020	79	-	-	152.8
	3	0.0010	0.0090	0.0015	0.0050	30.0	0.0136	0.0026	60	0.00017	0.0017	244.1
	4	0.0012	0.0089	0.0015	0.0064	30.0	0.0143	0.0026	60	0.00017	0.0030	164.3
	5	0.0011	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0102	0.0021	49	-	-	223.6
	6	0.0010	0.0061	0.0010	0.0051	30.0	0.0100	0.0026	47	-	-	150.1
	7	0.0013	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0100	0.0035	43	0.00015	0.0015	188.8
	8	0.0012	0.0066	0.0010	0.0056	30.0	0.0100	0.0037	41	0.00015	0.0027	129.1
8	1	0.0017	0.0084	0.0010	0.0074	30.0	0.0100	0.0018	68	-	-	174.4
	2	0.0016	0.0092	0.0010	0.0082	30.0	0.0101	0.0023	60	-	-	125.3
	3	0.0014	0.0084	0.0015	0.0053	30.0	0.0103	0.0027	62	0.00016	0.0023	184.2
	4	0.0015	0.0096	0.0015	0.0072	30.0	0.0127	0.0030	55	0.00016	0.0022	135.4
	5	0.0014	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0100	0.0022	47	-	-	182.7
	6	0.0013	0.0071	0.0010	0.0061	30.0	0.0100	0.0028	41	-	-	124.0
	7	0.0015	0.0071	0.0010	0.0061	30.0	0.0100	0.0037	39	0.00014	0.0014	160.7
	8	0.0015	0.0078	0.0010	0.0068	30.0	0.0100	0.0042	35	0.00014	0.0014	109.6

ตารางที่ 4.12 ผลการออกแบบไม้ขี้หม้อน้ำรถยนต์ที่สภาวะปกติ (ต่อ)

ข้อกำหนด	รูปแบบ หม้อน้ำ	Fp (เมตร)	FI (เมตร)	Lp (เมตร)	LI (เมตร)	La (องศา)	Td (เมตร)	Tw (เมตร)	Nt (ท่อ)	e (เมตร)	p (เมตร)	C (บาท)
9	1	0.0017	0.0067	0.0010	0.0057	30.0	0.0100	0.0017	77	-	-	224.9
	2	0.0015	0.0079	0.0010	0.0069	30.0	0.0100	0.0022	64	-	-	159.5
	3	0.0020	0.0068	0.0010	0.0058	30.0	0.0100	0.0028	67	0.00016	0.0018	188.8
	4	0.0018	0.0081	0.0010	0.0071	30.0	0.0100	0.0034	56	0.00016	0.0017	136.3
	5	0.0013	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0110	0.0022	46	-	-	261.2
	6	0.0012	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0027	44	-	-	172.7
	7	0.0016	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0035	42	0.00015	0.0019	213.4
	8	0.0015	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0100	0.0041	39	0.00015	0.0015	143.4
10	1	0.0016	0.0068	0.0010	0.0058	30.0	0.0100	0.0019	80	-	-	312.0
	2	0.0015	0.0076	0.0010	0.0066	30.0	0.0100	0.0024	70	-	-	221.4
	3	0.0016	0.0085	0.0015	0.0069	30.0	0.0111	0.0033	59	0.00019	0.0019	285.1
	4	0.0018	0.0086	0.0010	0.0076	30.0	0.0115	0.0036	57	0.00019	0.0021	192.1
	5	0.0012	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0025	48	-	-	367.2
	6	0.0012	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0103	0.0029	47	-	-	243.5
	7	0.0016	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0039	44	0.00018	0.0023	289.3
	8	0.0015	0.0061	0.0010	0.0051	30.0	0.0100	0.0045	42	0.00018	0.0018	195.1

ข้อกำหนด	รูปแบบหมอน้ำ	Fp (เมตร)	Fl (เมตร)	Lp (เมตร)	LI (เมตร)	La (องศา)	Td (เมตร)	Tw (เมตร)	Nt (ท่อ)	e (เมตร)	p (เมตร)	C (บาท)
1	1	0.0018	0.0081	0.0010	0.0071	30.0	0.0100	0.0019	68	-	-	147.6
	2	0.0017	0.0084	0.0010	0.0074	30.0	0.0100	0.0024	63	-	-	103.7
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	0.0015	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0100	0.0024	46	-	-	156.8
	6	0.0014	0.0067	0.0010	0.0057	30.0	0.0100	0.0030	42	-	-	104.7
	7	0.0017	0.0067	0.0010	0.0057	30.0	0.0100	0.0037	40	0.0002	0.0035	138.2
	8	0.0016	0.0074	0.0010	0.0064	30.0	0.0100	0.0043	36	0.0002	0.0028	92.6
2	1	0.0017	0.0082	0.0010	0.0072	30.0	0.0100	0.0019	71	-	-	208.4
	2	0.0016	0.0095	0.0010	0.0085	30.0	0.0100	0.0025	60	-	-	144.9
	3	0.0014	0.0091	0.0015	0.0056	30.0	0.0106	0.0033	58	0.0002	0.0019	219.0
	4	0.0015	0.0100	0.0015	0.0073	30.0	0.0120	0.0036	53	0.0002	0.0021	151.1
	5	0.0015	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0100	0.0024	49	-	-	221.9
	6	0.0014	0.0067	0.0010	0.0057	30.0	0.0100	0.0030	44	-	-	147.9
	7	0.0017	0.0068	0.0010	0.0058	30.0	0.0100	0.0041	41	0.0002	0.0018	191.8
	8	0.0015	0.0077	0.0010	0.0067	30.0	0.0100	0.0047	36	0.0002	0.0017	128.8
3	1	0.0016	0.0078	0.0010	0.0068	30.0	0.0100	0.0019	70	-	-	173.7
	2	0.0015	0.0066	0.0010	0.0056	30.0	0.0100	0.0040	40	-	-	160.5
	3	0.0014	0.0086	0.0015	0.0066	30.0	0.0111	0.0031	58	0.0002	0.0018	171.4
	4	0.0015	0.0094	0.0015	0.0084	30.0	0.0123	0.0034	53	0.0002	0.0021	119.0
	5	0.0014	0.0086	0.0015	0.0066	30.0	0.0111	0.0031	58	-	-	171.4
	6	0.0013	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0100	0.0029	44	-	-	124.2
	7	0.0015	0.0066	0.0010	0.0056	30.0	0.0100	0.0040	40	0.0002	0.0017	160.5
	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	1	0.0015	0.0074	0.0010	0.0064	30.0	0.0100	0.0022	60	-	-	160.7
	2	0.0014	0.0086	0.0010	0.0076	30.0	0.0100	0.0028	51	-	-	111.9
	3	0.0015	0.0085	0.0015	0.0075	30.0	0.0120	0.0033	49	0.0002	0.0027	155.9
	4	0.0014	0.0092	0.0014	0.0082	30.0	0.0120	0.0037	45	0.0002	0.0037	110.0
	5	0.0012	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0029	39	-	-	175.5
	6	0.0012	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0100	0.0034	37	-	-	116.9
	7	0.0014	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0100	0.0046	34	0.0002	0.0017	151.2
	8	0.0013	0.0071	0.0010	0.0061	30.0	0.0100	0.0053	30	0.0002	0.0017	101.5

ข้อกำหนด	รูปแบบหมอน้ำ	Fp (เมตร)	Fl (เมตร)	Lp (เมตร)	LI (เมตร)	La (องศา)	Td (เมตร)	Tw (เมตร)	Nt (ท่อน)	e (เมตร)	p (เมตร)	C (บาท)
5	1	0.0016	0.0077	0.0010	0.0067	30.0	0.0100	0.0023	66	-	-	161.4
	2	0.0015	0.0089	0.0010	0.0079	30.0	0.0100	0.0029	56	-	-	112.9
	3	0.0016	0.0091	0.0015	0.0078	30.0	0.0122	0.0036	52	0.0002	0.0021	157.3
	4	0.0017	0.0095	0.0010	0.0085	30.0	0.0124	0.0040	49	0.0002	0.0026	108.1
	5	0.0014	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0107	0.0028	45	-	-	177.3
	6	0.0013	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0100	0.0034	42	-	-	117.5
	7	0.0015	0.0064	0.0010	0.0054	30.0	0.0100	0.0047	38	0.0002	0.0019	150.0
	8	0.0014	0.0073	0.0010	0.0063	30.0	0.0100	0.0055	33	0.0002	0.0019	101.3
6	1	0.0014	0.0072	0.0010	0.0062	30.0	0.0100	0.0017	81	-	-	235.5
	2	0.0013	0.0065	0.0014	0.0055	30.0	0.0101	0.0020	85	-	-	171.8
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	0.0011	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0023	51	-	-	255.7
	6	0.0011	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0104	0.0026	48	-	-	169.7
	7	0.0014	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0100	0.0035	46	0.0002	0.0029	213.7
	8	0.0013	0.0064	0.0010	0.0054	30.0	0.0100	0.0038	44	0.0002	0.0041	143.3
7	1	0.0014	0.0072	0.0010	0.0062	30.0	0.0100	0.0017	77	-	-	208.9
	2	0.0013	0.0064	0.0013	0.0054	30.0	0.0100	0.0020	82	-	-	151.8
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	0.0012	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0108	0.0021	49	-	-	229.0
	6	0.0011	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0102	0.0027	46	-	-	150.3
	7	0.0014	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0100	0.0034	45	0.0002	0.0029	192.0
	8	0.0013	0.0064	0.0010	0.0054	30.0	0.0100	0.0037	42	0.0002	0.0043	128.6
8	1	0.0018	0.0083	0.0010	0.0073	30.0	0.0100	0.0019	68	-	-	175.0
	2	0.0017	0.0088	0.0010	0.0078	30.0	0.0101	0.0023	62	-	-	122.2
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	*
	6	0.0014	0.0068	0.0010	0.0058	30.0	0.0100	0.0028	42	-	-	123.3
	7	0.0017	0.0067	0.0010	0.0057	30.0	0.0100	0.0036	41	0.0002	0.0024	162.9
	8	0.0016	0.0075	0.0010	0.0065	30.0	0.0100	0.0043	36	0.0002	0.0022	108.9

ข้อกำหนด	รูปแบบหม้อน้ำ	Fp (เมตร)	Fl (เมตร)	Lp (เมตร)	LI (เมตร)	La (องศา)	Td (เมตร)	Tw (เมตร)	Nt (ท่อ)	e (เมตร)	p (เมตร)	C (บาท)
9	1	0.0018	0.0064	0.0010	0.0054	30.0	0.0100	0.0018	78	-	-	232.7
	2	0.0017	0.0064	0.0010	0.0054	30.0	0.0100	0.0022	75	-	-	161.9
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	0.0013	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0106	0.0025	45	-	-	277.5
	6	0.0012	0.0063	0.0010	0.0053	30.0	0.0107	0.0029	42	-	-	182.7
	7	0.0017	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0106	0.0038	41	0.0002	0.0026	223.0
	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	1	0.0018	0.0068	0.0010	0.0058	30.0	0.0100	0.0020	79	-	-	317.2
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	0.0012	0.0100	0.0015	0.0051	30.0	0.0115	0.0037	51	0.0002	0.0021	363.4
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	0.0013	0.0060	0.0010	0.0050	30.0	0.0103	0.0026	48	-	-	378.1
	6	0.0012	0.0062	0.0010	0.0052	30.0	0.0102	0.0031	45	-	-	249.0
	7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	8	0.0016	0.0061	0.0010	0.0051	30.0	0.0100	0.0048	41	0.0002	0.0020	195.4

4.4 วิเคราะห์ผลการอุปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์

จากตารางที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นว่า ตัวแปรออกแบบที่ได้จากการอุปติไมซ์ที่สภาวะปกติ และภายใต้ความไม่แน่นอนนั้นแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติควรนำผลอุปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนไปใช้ในการออกแบบ เนื่องจากเป็นการออกแบบที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนจากสมการและความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณ

สามารถสรุปผลการอุปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน แบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตถังถังได้ดังนี้

1. รั้งถังทองแดง-ทองเหลือง

สำหรับข้อกำหนดที่ 1 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 2
- ไม่สามารถใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 1 เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้

สำหรับข้อกำหนดที่ 2 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 2
- ค่าใช้จ่ายจะสูงที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 1
- ค่าใช้จ่ายที่ใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 1 และค่าใช้จ่ายที่ใช้ท่อเรียบผลิตถังถังแบบที่ 2 จะใกล้เคียงกัน

สำหรับข้อกำหนดที่ 3 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 2
- ค่าใช้จ่ายจะสูงที่สุด ถ้าใช้ท่อเรียบผลิตถังถังแบบที่ 1
- ค่าใช้จ่ายที่ใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 1 และค่าใช้จ่ายที่ใช้ท่อเรียบผลิตถังถังแบบที่ 2 จะใกล้เคียงกัน

สำหรับข้อกำหนดที่ 4, 5 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 2
- ค่าใช้จ่ายจะสูงที่สุด ถ้าใช้ท่อเรียบผลิตถังถังแบบที่ 2

สำหรับข้อกำหนดที่ 6, 7, 9 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 2
- ไม่สามารถใช้ท่อแบบ rib ผลิตถังถังแบบที่ 1 ได้ เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้

สำหรับข้อกำหนดที่ 8 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 2
- ไม่สามารถใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 1 และใช้ท่อเรียบผลิตรังผึ้งแบบที่ 2 เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้

สำหรับข้อกำหนดที่ 10 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อเรียบผลิตรังผึ้งแบบที่ 1
- ไม่สามารถใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 2 เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้

จะเห็นได้ว่า สำหรับข้อกำหนดที่ 1-9 การผลิตรังผึ้งทองแดง-ทองเหลืองควรผลิตรังผึ้งแบบที่ 2 และใช้ท่อแบบ rib เนื่องจากเป็นรูปแบบหม้อน้ำที่ทำให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด และสำหรับข้อกำหนดที่ 10 ควรใช้ท่อเรียบผลิตรังผึ้งแบบที่ 1

2. รังผึ้งอะลูมิเนียม

สำหรับข้อกำหนดที่ 1, 6, 7, 8 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 2
- ถ้าใช้ท่อเรียบผลิตรังผึ้งทั้งสองแบบ ค่าใช้จ่ายจะใกล้เคียงกัน
- ไม่สามารถใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 1 เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้

สำหรับข้อกำหนดที่ 2 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 2
- ค่าใช้จ่ายจะสูงที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 1
- ถ้าใช้ท่อเรียบผลิตรังผึ้งทั้งสองแบบ ค่าใช้จ่ายจะใกล้เคียงกัน

สำหรับข้อกำหนดที่ 3 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 1
- ไม่สามารถใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 2 เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้

สำหรับข้อกำหนดที่ 4, 5 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 2
- ค่าใช้จ่ายจะสูงที่สุด ถ้าใช้ท่อเรียบผลิตรังผึ้งแบบที่ 2

สำหรับข้อกำหนดที่ 9 พบว่า

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อเรียบผลิตรังผึ้งแบบที่ 1
- ไม่สามารถใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งทั้งสองแบบ เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปร

ออกแบบที่เหมาะสมได้

สำหรับข้อกำหนดที่ 10

- ค่าใช้จ่ายจะต่ำที่สุด ถ้าใช้ท่อแบบ rib ผลิตรังผึ้งแบบที่ 2
 - ไม่สามารถผลิตรังผึ้งแบบที่ 1 โดยใช้ท่อทั้งสองแบบ เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปร
- ออกแบบที่เหมาะสมได้

จะเห็นได้ว่า ในการผลิตรังผึ้งอะลูมิเนียมควรผลิตรังผึ้งแบบที่ 2 และใช้ท่อแบบ rib เนื่องจากเป็นรูปแบบหม้อน้ำที่ทำให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดสำหรับข้อกำหนดที่ 1-2, 4-8 และ 10 อย่างไรก็ตาม สำหรับข้อกำหนดที่ 3, 9 ควรใช้หม้อน้ำรูปแบบอื่น เนื่องจากไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมได้สำหรับรูปแบบดังกล่าว

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรังผึ้งทองแดง-ทองเหลือง และรังผึ้งอะลูมิเนียม พบว่า

สำหรับข้อกำหนดที่ 2-10 หม้อน้ำทุกรูปแบบที่รังผึ้งทำจากอะลูมิเนียมจะมีราคาต่ำกว่ารังผึ้งทองแดง-ทองเหลือง ในขณะที่รังผึ้งอะลูมิเนียมแบบที่ 1 ที่ใช้ท่อแบบ rib จะมีราคาสูงกว่ารังผึ้งทองแดง-ทองเหลืองแบบที่ 2 ที่ใช้ท่อแบบ rib สำหรับข้อกำหนดที่ 1

จากผลการอุปติไมซ์ทั้ง 2 กรณี พบว่า หม้อน้ำรถยนต์ที่ประกอบด้วยท่อและครีปที่ทำจากอะลูมิเนียม และมีลักษณะรังผึ้งแบบครีปลูเวอร์ทิงอและมีแผ่นกันเป็นรูปแบบหม้อน้ำที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ทำให้ค่าวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตรังผึ้งหม้อน้ำรถยนต์มีค่าต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบและการทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์ที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 10 เงื่อนไข นอกจากนี้ยังพบว่า รังผึ้งอะลูมิเนียมจะมีราคาถูกกว่ารังผึ้งทองแดง-ทองเหลือง ซึ่งสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและกลศาสตร์ของไหลได้ดังนี้

ที่สภาวะวิกฤติหรือสภาวะที่ทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์ อากาศจะมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนมากกว่าน้ำ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศต่ำกว่าน้ำมาก การที่จะทำให้รังผึ้งสามารถถ่ายเทความร้อนได้ตามที่ต้องการนั้น จะต้องเพิ่มพื้นที่ของครีปให้สัมผัสกับอากาศมากขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะของรังผึ้งทั้ง 2 แบบ พบว่า เพื่อที่จะทำให้พื้นที่สัมผัสกับอากาศเท่ากัน รังผึ้งแบบที่ 2 จะต้องใช้ความยาวของครีบบนและระยะห่างระหว่างครีบน้อยกว่ารังผึ้งแบบที่ 1 และเมื่อความยาวของครีบน้อยกว่า ประกอบกับมีแผ่นกันแทรกอยู่ตรงกลางระหว่างท่อกับครีบบน จะทำให้จำนวนท่อที่ใช้มีน้อยกว่ารังผึ้งแบบที่ 1 และเพื่อที่จะรักษาความดันลดของน้ำให้อยู่ไม่เกินค่าที่กำหนด จึงต้องเพิ่มความกว้างของท่อให้มากขึ้น ซึ่งตรงกับผลของปตีไมซ์

เมื่อพิจารณาวัสดุที่ใช้ทำครีบบน พบว่า ครีบบนอะลูมิเนียมมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าทองแดง และมีความหนาแน่นน้อยกว่าครีบบนทองแดง การที่จะถ่ายเทความร้อนในปริมาณที่เท่ากันกับครีบบนทองแดงจึงต้องใช้พื้นที่ของครีบบนอะลูมิเนียมมากกว่า ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับอากาศของครีบบนอะลูมิเนียมได้จากการเพิ่มความยาวของครีบบน จำนวนท่อที่ใช้จะลดลง ความดันของน้ำในท่อเพิ่มขึ้น และเพื่อที่จะรักษาความดันลดของน้ำให้อยู่ไม่เกินค่าที่กำหนด จึงต้องเพิ่มความกว้างของท่อให้มากขึ้น ซึ่งตรงกับผลของปตีไมซ์ อย่างไรก็ตามถึงแม้รังผึ้งอะลูมิเนียมจะต้องใช้พื้นที่ของครีบบนมากกว่า แต่เนื่องจากราคาของครีบบนอะลูมิเนียมต่ำกว่าครีบบนทองแดงมาก (ต่างกันตารางเมตรละ 20 บาท) ทำให้ราคาของรังผึ้งอะลูมิเนียมยังคงต่ำกว่ารังผึ้งทองแดง-ทองเหลือง

และเมื่อพิจารณาท่อแบบ rib พบว่า ความขรุขระแบบ rib จะทำลาย laminar sublayer ทำให้น้ำที่ไหลภายในท่อแบบ rib ถ่ายเทความร้อนดีกว่าน้ำที่ไหลภายในท่อผิวเรียบ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของรังผึ้งดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ท่อแบบ rib และรังผึ้งแบบที่ 2 จะทำให้ความดันลดของน้ำและอากาศสูงกว่าท่อเรียบและรังผึ้งแบบที่ 1 ทำให้บางกรณี เช่น ข้อจำกัดที่ 3 และ 9 ไม่สามารถหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมสำหรับหม้อน้ำที่ประกอบด้วยท่อแบบ rib หรือมีลักษณะรังผึ้งแบบที่ 2 ภายได้เงื่อนไขที่กำหนดได้

4.5 การวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis)

ในกรณีศึกษาครั้งนี้จะวิเคราะห์ความไวของระบบต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล แפקเตอร์ความเสียหายของของไหล และสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการลดและขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของของไหล โดยจะศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้ต่อฟังก์ชันค่าใช้จ่ายเมื่อพารามิเตอร์แต่ละตัวนั้นมีการเบี่ยงเบนหรือเปลี่ยนแปลงไป $\pm 5\%$ $\pm 10\%$ และ $\pm 15\%$ ของค่าปกติที่คำนวณได้จากสมการและความสัมพันธ์ที่ใช้ในการออกแบบหม้อน้ำรถยนต์

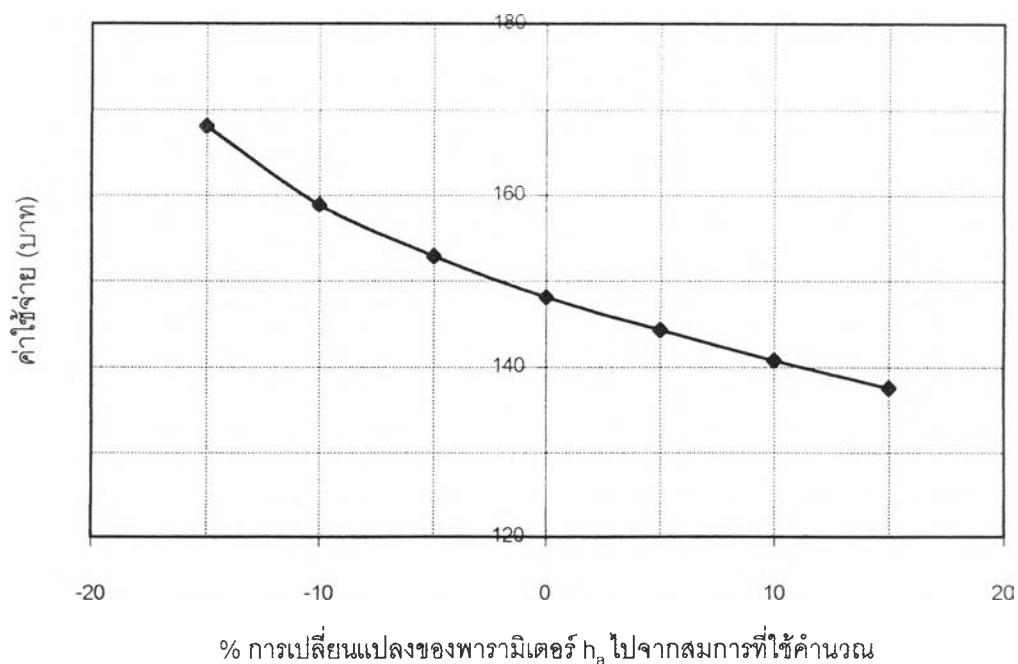
วิธีวิเคราะห์ความไวจะเริ่มจากการกำหนดให้พารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไป +5% ทำการออปติไมซ์เพื่อหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมที่ทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่าต่ำที่สุด ต่อจากนั้นจึงออปติไมซ์เพื่อหาตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมที่ทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่าต่ำที่สุดเมื่อพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไป +10%, +15%, -5%, -10% และ -15% ตามลำดับ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่างฟังก์ชันค่าใช้จ่ายกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์จะได้เส้นกราฟความไว ซึ่งความไวของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายต่อพารามิเตอร์สามารถพิจารณาได้จากค่าของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายที่เปลี่ยนแปลงไป

ในส่วนนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์ความไวสำหรับหม้อน้ำรถยนต์แบบที่ 1 สำหรับข้อกำหนดที่ 1 และกำหนดค่าเฉพาะและค่าขอบเขตดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

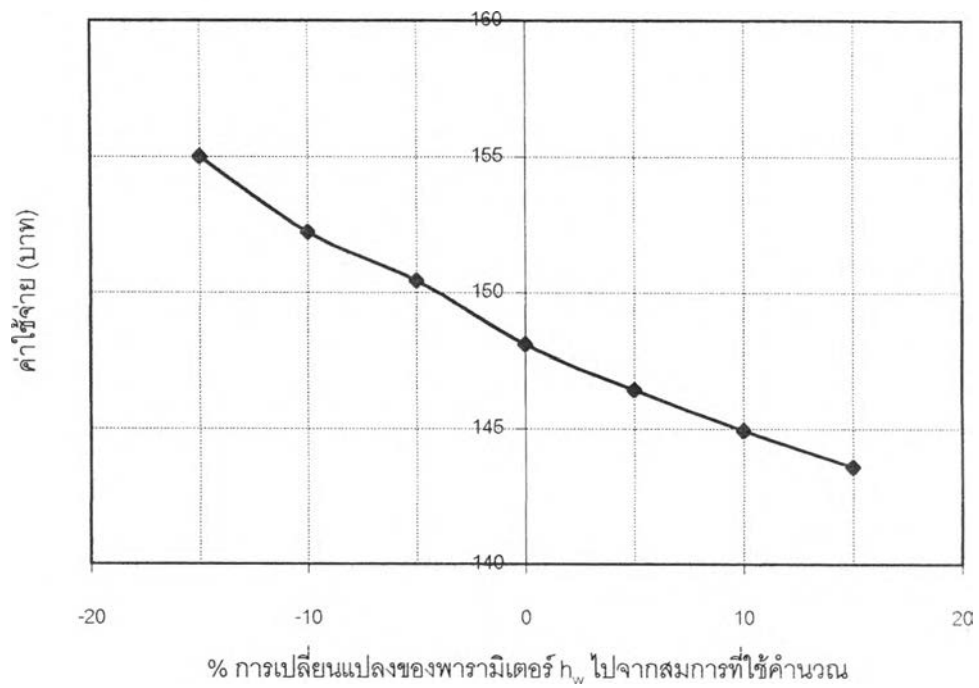
รูปที่ 4.5.1 – 4.5.8 แสดงผลการวิเคราะห์ความไวของฟังก์ชันค่าใช้จ่าย เมื่อพารามิเตอร์ต่างๆ มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองในช่วง $\pm 15\%$

4.5.1 กรณีที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง



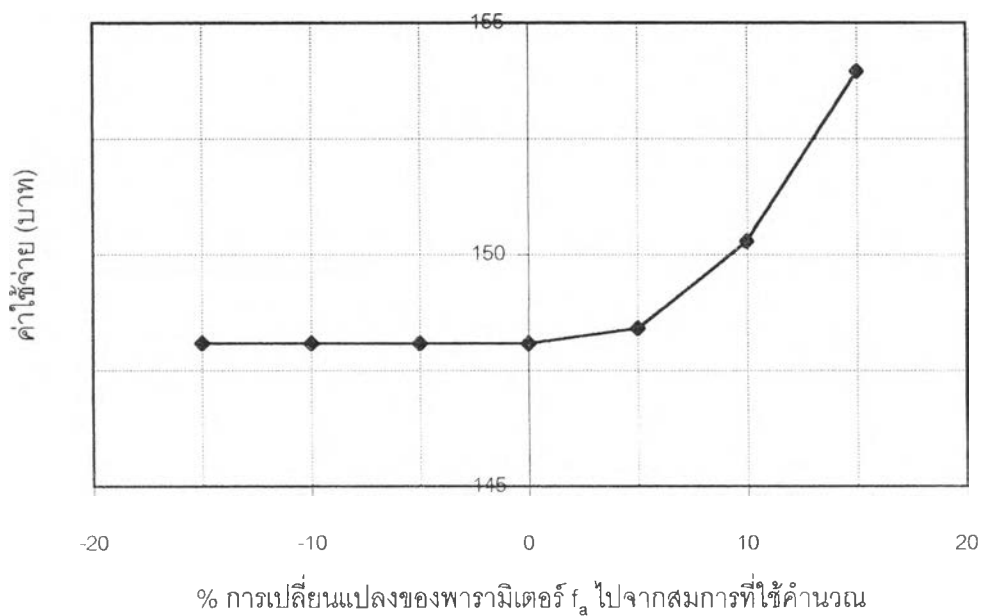
รูปที่ 4.4 เส้นกราฟความไวเมื่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง

4.5.2 กรณีที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง



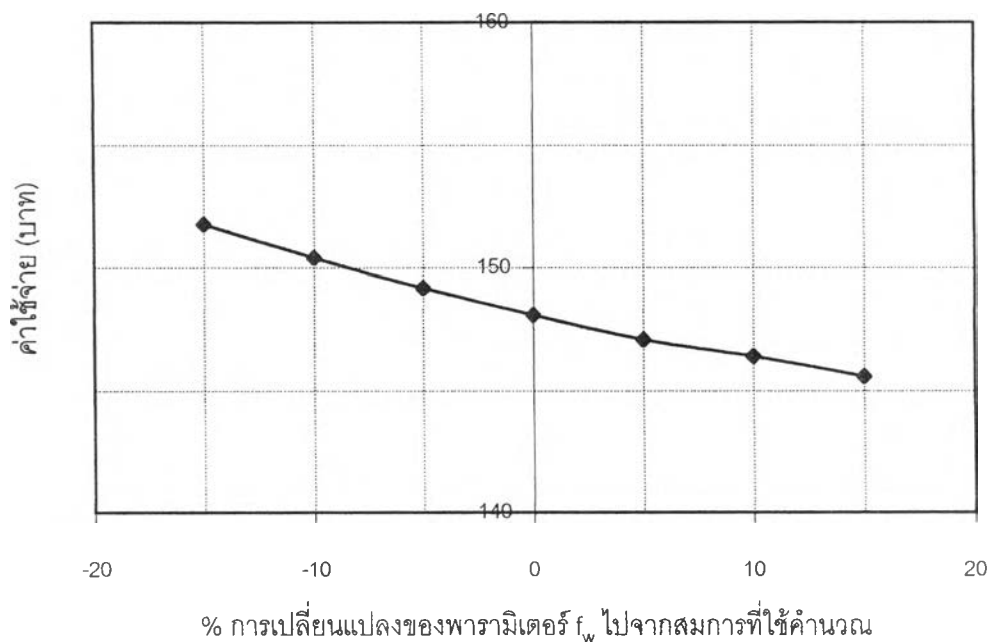
รูปที่ 4.5 เส้นกราฟความไวเมื่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

4.5.3 กรณีที่แฟกเตอร์ความเสียดทานของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง



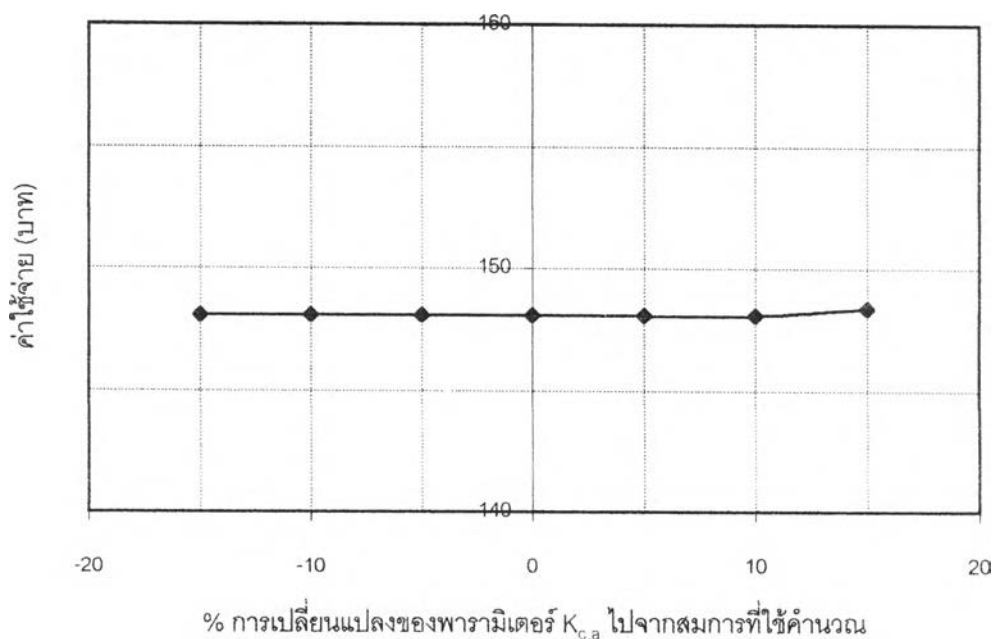
รูปที่ 4.6 เส้นกราฟความไวเมื่อแฟกเตอร์ความเสียดทานของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง

4.5.4 กรณีที่แฟกเตอร์ความเสียดทานของน้ำที่ไหลผ่านท่อแบนมีการเปลี่ยนแปลง



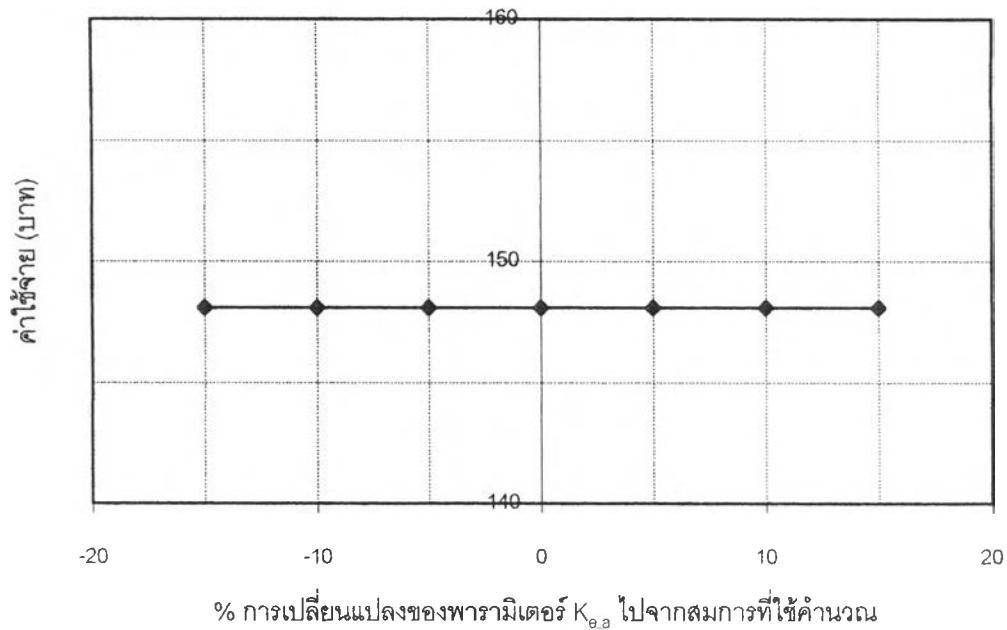
รูปที่ 4.7 เส้นกราฟความไวเมื่อแฟกเตอร์ความเสียดทานของน้ำที่ไหลผ่านท่อแบนมีการเปลี่ยนแปลง

4.5.5 กรณีที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง



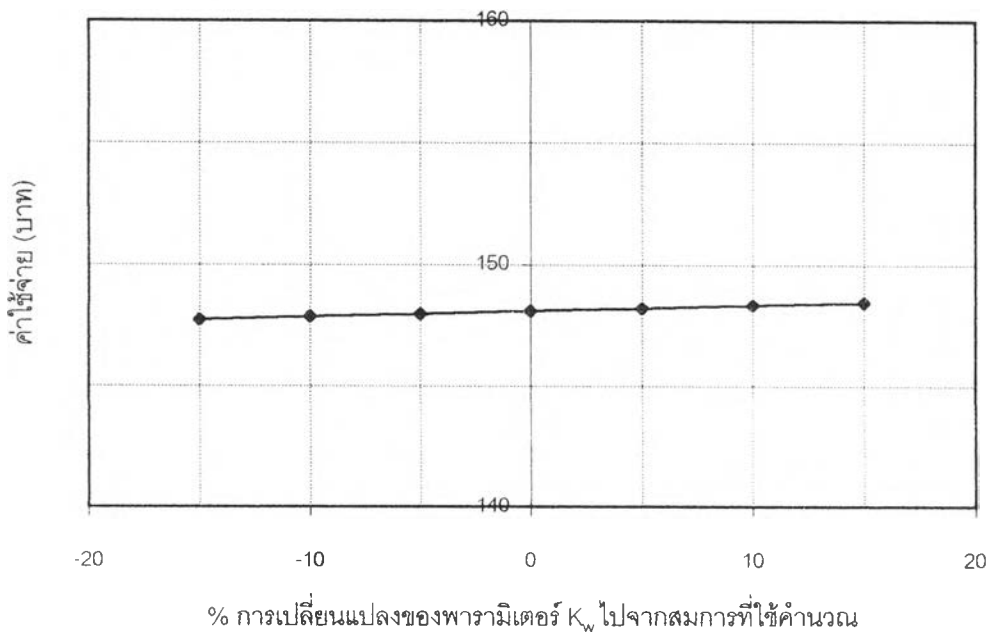
รูปที่ 4.8 เส้นกราฟความไวเมื่อสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง

4.5.6 กรณีที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง



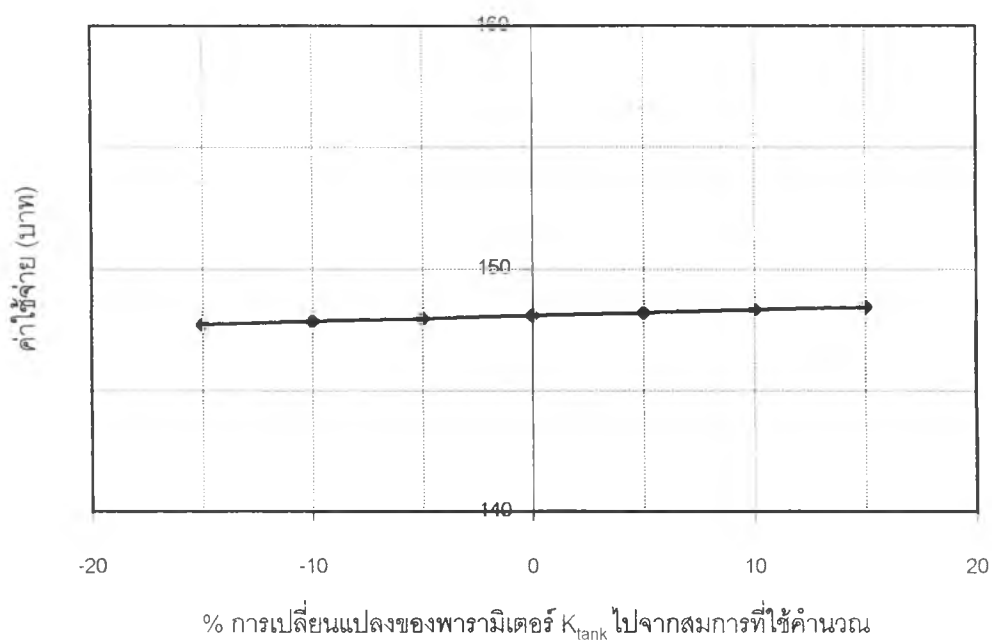
รูปที่ 4.9 เส้นกราฟความไวเมื่อสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง

4.5.7 กรณีที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดและขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.10 เส้นกราฟความไวเมื่อสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดและขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

4.5.8 กรณีที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.11 เส้นกราฟความไวเมื่อสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของน้ำที่ไหลผ่านถังน้ำ

ตารางที่ 4.13 ผลวิเคราะห์ความไว

พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง	การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันค่าใช้จ่าย (บาท) เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปในช่วง $\pm 15\%$
h_a	- 30.5825
h_w	- 11.4131
f_a	+ 5.8834
f_w	- 6.1802
$K_{c,a}$	0.0000
$K_{e,a}$	- 0.2963
K_w	- 0.5977
K_{tank}	- 0.6793

จากกราฟวิเคราะห์ความไวรูปที่ 4.4- 4.11 และตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า

1. ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีความไวต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและแพกเตอร์ความเสียหายของของไหล แต่ไม่มีความไวต่อสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการลดและขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของของไหล

2. ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีความไวต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศมากที่สุด ทั้งนี้เพราะสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมาก จึงทำให้อากาศมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์มากกว่าน้ำ

3. เมื่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศและน้ำ และแพกเตอร์ความเสียหายของน้ำมีค่ามากขึ้น จะทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่าลดลง ในขณะที่แพกเตอร์ความเสียหายของอากาศจะทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายมีค่าเพิ่มขึ้น

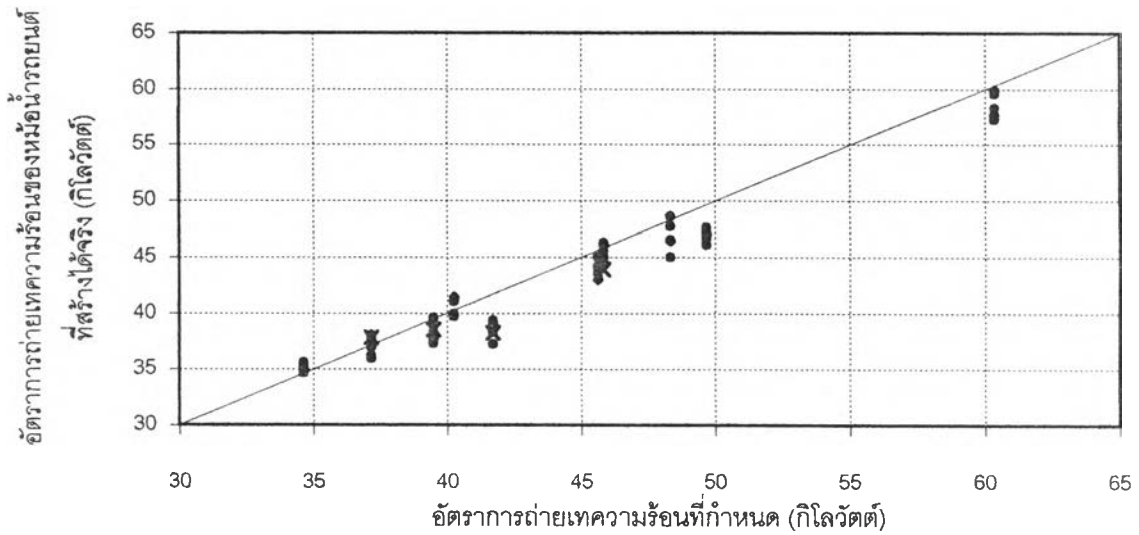
4.6 การทดสอบความถูกต้องของการนำผลการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนไปใช้ในการออกแบบหม้อน้ำรถยนต์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดสอบความถูกต้องของการนำผลการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนไปใช้ในการออกแบบหม้อน้ำรถยนต์ เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้นจะมีข้อจำกัดของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตท่อและครีป ทำให้ไม่สามารถสร้างหม้อน้ำรถยนต์ที่มีตัวแปรออกแบบเท่ากับผลการออปติไมซ์ที่มีค่าเป็นจำนวนจริงได้ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างได้จริงคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่กำหนดหรือค่าที่ออกแบบ

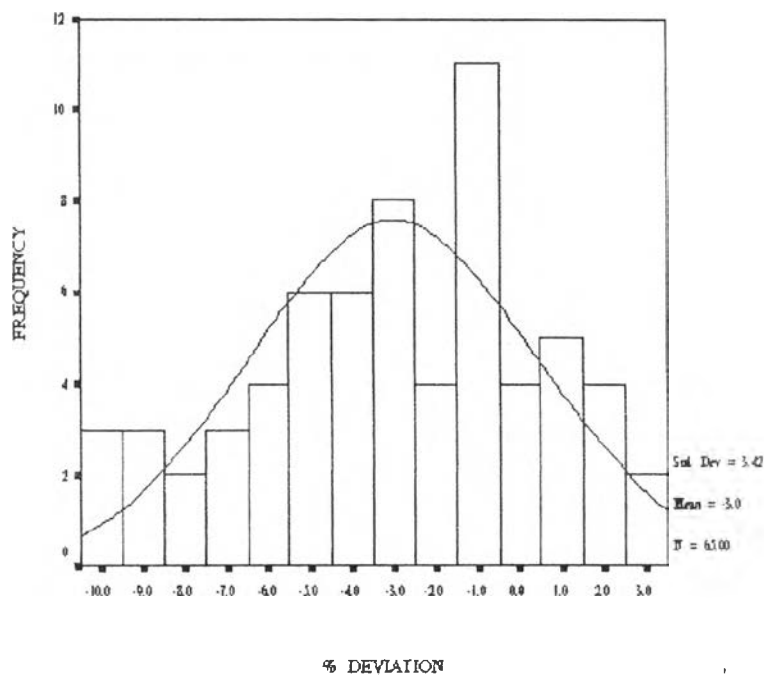
สำหรับความถูกต้องของการนำผลการออปติไมซ์ไปใช้ในการออกแบบนั้นจะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างได้จริงไปจากค่าที่กำหนด ในส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างได้จริงนั้นจะคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณคุณลักษณะของหม้อน้ำรถยนต์ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) โดยเพิ่มสมการต่างๆ ที่ใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์กรณีที่กำลังถึงความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ และแทนค่าตัวแปรออกแบบที่ได้จากผลออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน (ตารางที่ 4.13) ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้เครื่องจักรสามารถผลิตท่อและครีปละเอียดในระดับ 0.1 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.12 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างได้จริงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่กำหนด

รูปที่ 4.13 แสดงผลการแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนของอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างได้จริงไปจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่กำหนด



รูปที่ 4.12 อัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างได้จริงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่กำหนด



รูปที่ 4.13 ฮิสโตแกรมแสดงการแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างได้จริงไปจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่กำหนด

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นได้ว่า ในทางปฏิบัติ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างขึ้นจริง จะคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบหรือค่าที่กำหนดอยู่ในช่วง -10 ถึง 3 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการออกแบบที่กำหนดให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจะต้องอยู่ในเกณฑ์ ± 15 % ของค่าที่ออกแบบ (มณูญ เคี่ยมการ, 2540) จึงสามารถนำโปรแกรมออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการออกแบบหม้อน้ำรถยนต์ได้

4.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงรูปแบบปัญหาออปติไมซ์ และผลการออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ที่สภาวะปกติซึ่งเป็นกรณีที่พิจารณาว่าสมการและความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองที่รวบรวมได้จากงานวิจัยก่อนหน้านั้นมีความถูกต้องยอมรับได้ และการออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ภายใต้ความไม่แน่นอนซึ่งเป็นกรณีที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ที่คำนวณจากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีความไม่แน่นอนทั้งจากความผิดพลาดของข้อมูลการทดลองที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ (จากผู้ทำการทดลองและชุดการทดลอง) และจากความคลาดเคลื่อนไปจากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง

ในส่วนของผลการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน จะใช้วิธีหาค่าคำตอบแบบดีเทอร์มินิสติก ทั้งนี้ เนื่องจากพารามิเตอร์มีลักษณะการกระจายของข้อมูลแบบดีสครีต ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตที่แน่นอนของพารามิเตอร์ได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของความไม่แน่นอนเท่ากับ ± 15 % และกำหนดให้โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจะเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลอง (สถานการณ์ปกติ), โอกาสที่พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากการทดลองแล้วมีผลทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายสูงขึ้น (สถานการณ์ที่แย่มากที่สุด) และโอกาสที่พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากการทดลองและมีผลทำให้ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายลดลง (สถานการณ์ที่ดีที่สุด) มีค่าเท่ากับ 0.8, 0.1 และ 0.1 ตามลำดับ

จากผลการออปติไมซ์ทั้งสองกรณี พบว่า ตัวแปรออกแบบที่ได้จากการออปติไมซ์ที่สภาวะปกติ และภายใต้ความไม่แน่นอนแตกต่างกัน แต่ไม่จำเป็นเสมอไปที่ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายของการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนจะสูงกว่าฟังก์ชันค่าใช้จ่ายของการออปติไมซ์ที่สภาวะปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนนั้นจะคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ทั้งบวกและลบ ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีโอเวอร์ดีไซน์แฟกเตอร์ซึ่งคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์เพียงด้านเดียว

นอกจากนี้ ยังพบว่าในบางข้อกำหนด ไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้เมื่อออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน แต่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้เมื่อออปติไมซ์ที่สภาวะปกติ ทั้งนี้ เนื่องจากการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนจะคำนึงถึงโอกาสที่พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นจากการทดลองจะคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากการทดลอง ดังนั้น ในทางปฏิบัติควรนำผลออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนไปใช้ในการออกแบบเพราะจะทำให้หม้อน้ำรถยนต์ที่ได้ออกแบบนั้นสามารถถ่ายเทความร้อนได้ในปริมาณที่ต้องการ มีความยืดหยุ่นตลอดขอบเขตของความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำรถยนต์ซึ่งเป็นสภาวะคงตัว

และเมื่อกำหนดให้เครื่องจักรสามารถผลิตท่อและครีบละเอียดในระดับ 0.1 มิลลิเมตร พบว่าในทางปฏิบัติ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ที่สร้างขึ้นจริง จะคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบหรือค่าที่กำหนด อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการออกแบบหม้อน้ำรถยนต์ ที่กำหนดให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจะต้องอยู่ในเกณฑ์ $\pm 15\%$ ของค่าที่ออกแบบ จึงสามารถนำไปโปรแกรมออกแบบและออปติไมซ์หม้อน้ำรถยนต์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการออกแบบหม้อน้ำรถยนต์ได้