# บทที่ 3
# การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

## 3.1 บทนำ

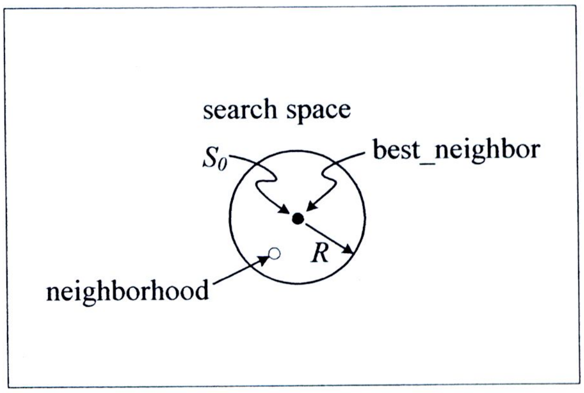
งานวิจัยนี้ได้มีการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการกำลังงานสูญเสียจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลการคำนวณ แต่เนื่องจากเป็นการยากที่ผู้วิจัยจะทราบพารามิเตอร์ของกำลังงานสูญเสียจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์วิธีทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยเลือกวิธี ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search) หรือเรียกโดยย่อว่า “ATS” ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอหลักการทำงาน กระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย ขอบเขตการค้นหา และการทดสอบพารามิเตอร์ รวมทั้งการตรวจสอบผลการค้นหาไว้ในบทนี้

## 3.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู (Tabu Search: TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสราวุฒิ สุจิตจร ในปี พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบูธรรมดา คือ การเดินย้อนรอย (black tracking) และการปรับค่ารัศมีการค้นหา (adaptive search radius) กลไกการเดินย้อนรอยจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุด กลไกนี้จะเลือกคำตอบในรายการตาบู (Tabu list) เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น สำหรับกลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

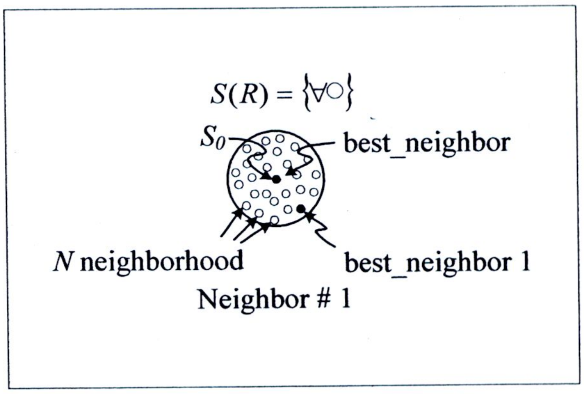
*ขั้นตอนที่ 1* กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

*ขั้นตอนที่ 2* ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น $S_0$ ภายในพื้นที่การค้นหา (search space) และให้ $S_0$ เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (best_neighbor) ดังรูปที่ 3.1




รูปที่ 3.1 สุ่มค่า $S_0$ ในพื้นที่การค้นหา

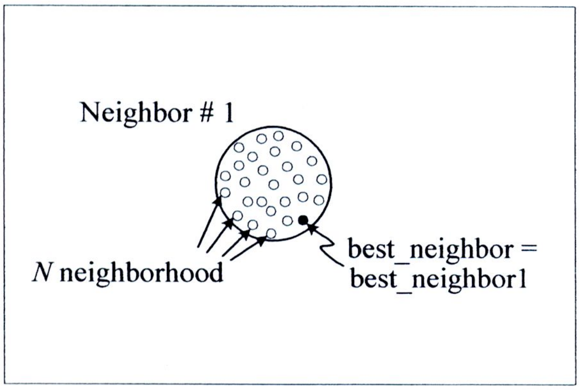
*ขั้นตอนที่ 3* ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน $N$ คำตอบ ($N$ neighborhood) รอบ ๆ $S_0$ ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา $R$ และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ $N$ คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 3.2



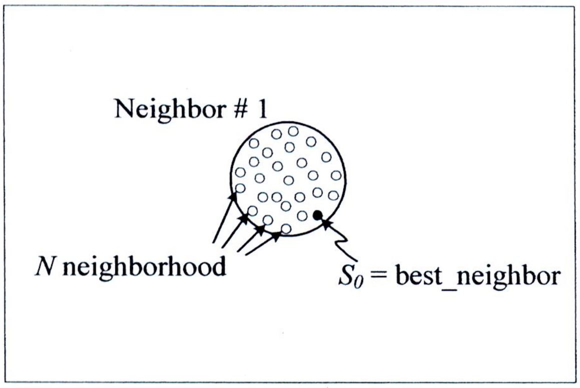

รูปที่ 3.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ $S_0$

*ขั้นตอนที่ 4* ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ $S_1$ เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (best_neighbor 1) ใน $S(R)$

*ขั้นตอนที่ 5* ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า $S_0$ ในรายการตาบูดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

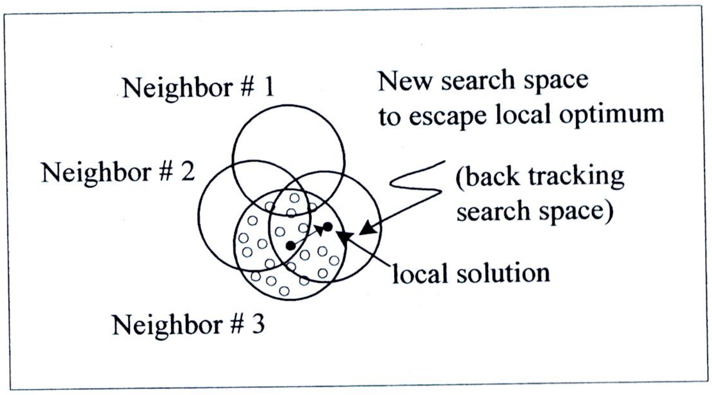



รูปที่ 3.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่




รูปที่ 3.4 กำหนดค่า $S_0$ ใหม่

*ขั้นตอนที่ 6* ถ้า $count \geq count_{max}$ จะหยุดกระบวนการการค้นหา โดยที่ค่า $S_0$ คือ คำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ




รูปที่ 3.5 กลไกการเดินย้อนรอย

*ขั้นตอนที่ 7* จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) เป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตาบูเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 3.5

*ขั้นตอนที่ 8* จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.1)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{3.1}$$

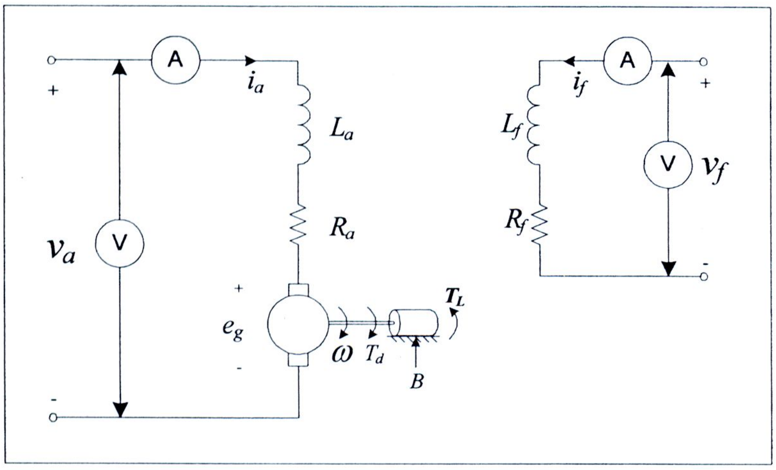
โดยที่ $DF$ คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

## 3.3 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์

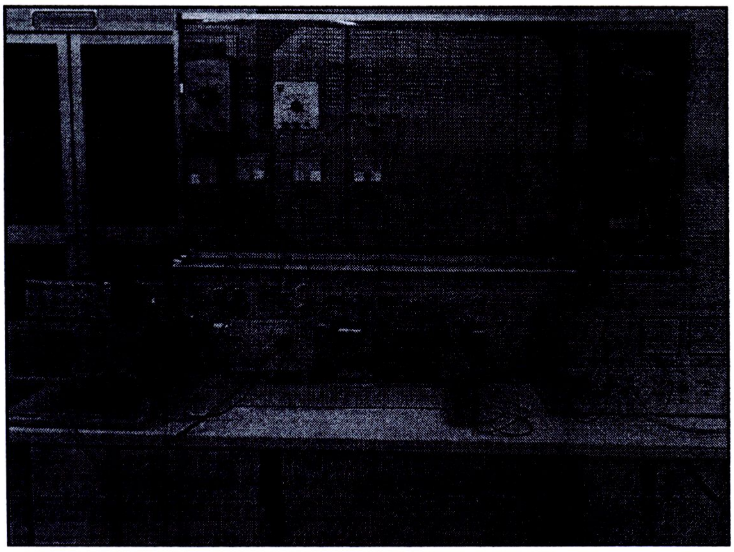
การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS ในงานวิจัยนี้ จะค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังสมการที่ (2.25) โดยจะดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียฮีสเตอริซีส ($K_h$) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก และค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน ($K_{st}$) การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์มีขั้นตอนในการดำเนินงาน 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

**3.3.1 การทดสอบมอเตอร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์**

การทดสอบมอเตอร์เพื่อใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ จะทำการทดสอบด้วยกัน 5 ชุดข้อมูล คือ 80% 90% 100% 110% และ 120% ของความเร็วพิกัด และได้ทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดข้อมูล 80% 100% และ 120% ของความเร็วพิกัด จะใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ และชุดข้อมูล 90% และ 110% ของความเร็วพิกัดใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจากการระบุเอกลักษณ์ โดยจะทำการทดสอบมอเตอร์ตามรูปที่ 3.6 และมีภาพถ่ายการทดสอบมอเตอร์เป็นดังรูปที่ 3.7 แสดงได้ดังนี้




รูปที่ 3.6 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การดำเนินการทดสอบมอเตอร์ จะดำเนินการดังนี้ คือ

*- การทดสอบที่ 80% และ 90% ของความเร็วพิกัด* จะปรับกระแสและแรงดันสนามให้คงที่ที่พิกัด และปรับแรงดันอาร์เมเจอร์ให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ

*- การทดสอบที่ 100% ของความเร็วพิกัด* จะปรับกระแสและแรงดันของวงจรสนามและวงจรอาร์เมเจอร์ไปที่พิกัด

*- การทดสอบที่ 110% และ 120% ของความเร็วพิกัด* จะปรับแรงดันอาร์เมเจอร์ให้คงที่ที่พิกัด และปรับแรงดันทางฝั่งวงจรสนามให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ

การทดสอบมอเตอร์ที่ความเร็วต่าง ๆ นั้นได้ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันทั้งด้านอาร์เมเจอร์และสนาม รวมถึงค่าแรงบิด เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังงานอินพุต กำลังงานเอาต์พุต และกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 สมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ ส่วนสมการคำนวณกำลังงานสูญเสียจะเป็นดังสมการที่ (3.2) และผลจากการทดสอบมอเตอร์พร้อมทั้งผลจากการคำนวณ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \tag{3.2}$$

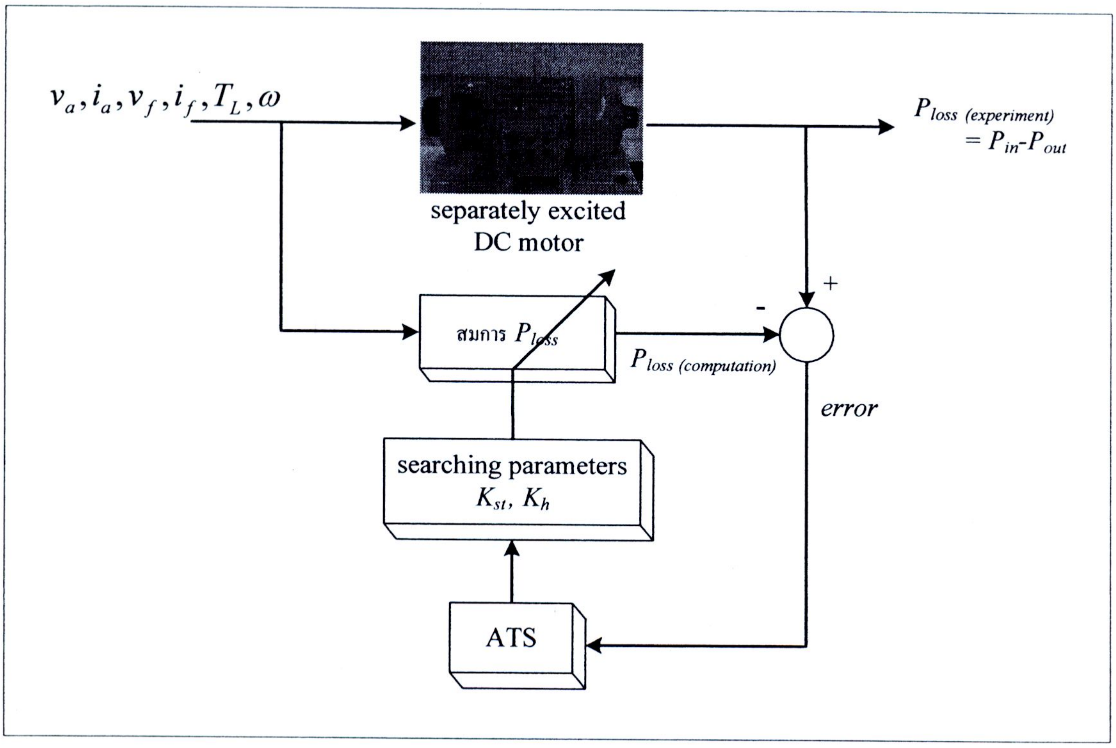
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบมอเตอร์

| speed | | $v_a$ | $i_a$ | $v_f$ | $i_f$ | $T_L$ | $P_{in}$ | $P_{out}$ | $P_{loss}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | rad/s | (V) | (A) | (V) | (A) | $(N \cdot m)$ | (W) | (W) | (W) |
| 80 | 197.71 | 182.80 | 2.20 | 220.00 | 0.30 | 1.54 | 468.16 | 304.28 | 163.88 |
| 90 | 222.43 | 201.20 | 2.20 | 220.00 | 0.30 | 1.54 | 508.64 | 342.53 | 166.11 |
| 100 | 247.87 | 220.00 | 2.20 | 220.00 | 0.30 | 1.55 | 550.00 | 383.71 | 166.29 |
| 110 | 270.28 | 220.00 | 2.20 | 186.50 | 0.22 | 1.39 | 524.10 | 374.34 | 149.76 |
| 120 | 297.40 | 220.00 | 2.20 | 143.30 | 0.19 | 1.23 | 511.23 | 365.81 | 145.42 |

### 3.3.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสีย

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียจะดำเนินการ โดยค้นหาค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว หรือ

วิธี ATS ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี ATS สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.8 ดังนี้




รูปที่ 3.8 แผนภาพการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS

จากรูปที่ 3.8 การคำนวณค่าความผิดพลาด (error) ระหว่างค่ากำลังงานสูญเสียจากการทดสอบ ($P_{loss(experiment)}$) กับค่ากำลังงานสูญเสียจากการคำนวณ ($P_{loss(computation)}$) จะเป็นอินพุตให้ ATS ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ โดยค่าผิดพลาดดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) และการเลือกค่าพารามิเตอร์ของวิธี ATS จะพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ *W* ซึ่งหมายถึง ค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส (root mean square error) ของค่า *error* สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4) ดังนี้

$$error = \left| P_{loss(experiment)} - P_{loss(computation)} \right| \tag{3.3}$$

$$W = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \tag{3.4}$$

โดยที่ $error$ คือ ผลต่างของค่ากำลังงานสูญเสียจากการทดสอบกับค่ากำลังงานสูญเสียจากการคำนวณ

$n$ คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด

การกำหนดขอบเขตของการค้นหาเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญ ดังนั้นที่มาของขอบเขตของพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่า สามารถอธิบายได้ดังนี้

*- ขอบเขตค่า* $K_{st}$

ขอบเขตค่า $K_{st}$ ได้มาจากการเปรียบเทียบ เนื่องจาก $K_{st}$ เป็นค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถคำนวณกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานได้จากสมการที่ (3.5) คือ

$$P_s = 1\%P_{in} = 1\%(V_a i_a + V_f i_f) \tag{3.5}$$

จาการศึกษาของ Alexander Kusko ในปี ค.ศ. 1983 ได้สมการกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งานดังสมการที่ (3.6)

$$P_s = K_{st}\frac{60^2}{4\pi^2}i_a^2\omega^2 \tag{3.6}$$

นำค่า $P_s$ จากสมการที่ (3.5) แทนในสมการที่ (3.6) จะเป็นดังสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$1\%(V_a i_a + V_f i_f) = K_{st}\frac{60^2}{4\pi^2}i_a^2\omega^2 \tag{3.7}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (3.7) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.2 ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่า $K_{st} = 2.04\times10^{-7}$ ดังนั้นจึงกำหนดขอบเขตการค้นหา คือ $1\times10^{-9} - 1\times10^{-6}$

*- ขอบเขตค่า* $K_h$

ขอบเขตค่า $K_h$ ได้มาจากการศึกษาของ Zaki ในปี 1998 จากการศึกษาของ Zaki เป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ ขนาด 1kW มีค่า $K_h = 0.067$ แต่มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นมอเตอร์ขนาด

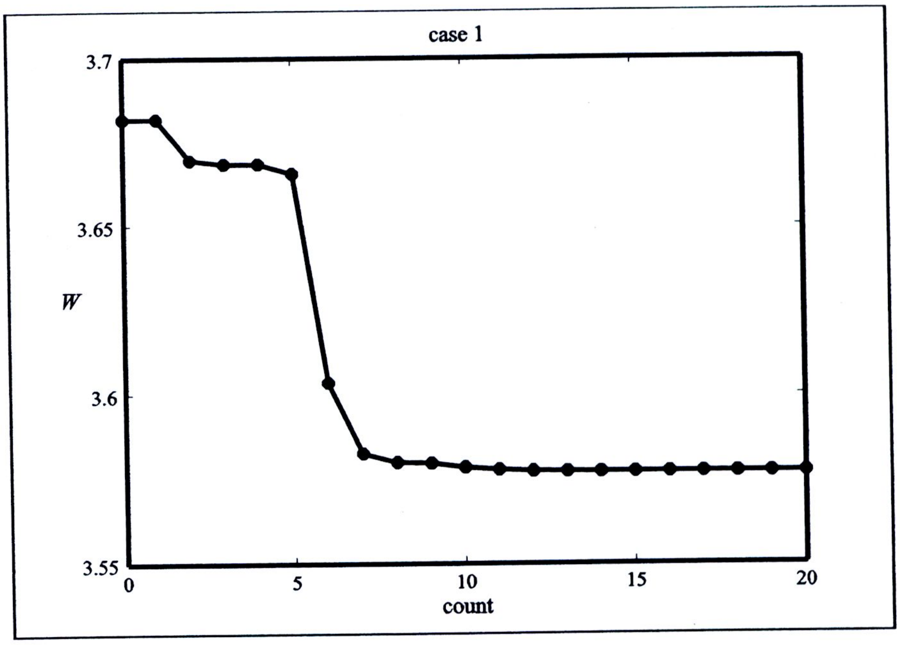
300 W ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า ดังนั้นค่า $K_h$ จึงน่าจะมีค่าน้อยกว่าจึงกำหนดให้มีขอบเขตอยู่ในช่วง $1\times10^{-4}$- $1\times10^{-1}$

จากการกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ข้างต้น ขอบเขตการค้นหาของ ATS เป็นดังตารางที่ 3.2 และทำการปรับขอบเขตการค้นหา เมื่อเกิดการชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างของทั้ง 4 กรณี ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ 1 ค่า $K_h$ มีค่าชนกับขอบเขตล่างการค้นหา จึงมีการขยายขอบเขตล่างออกไปอีก และเมื่อทำการปรับขอบเขตไปเรื่อย ๆ จะพบว่าขอบเขตการค้นหาในกรณีที่ 4 ค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 2 อยู่ในช่วงของขอบเขตและมีค่า $W$ น้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขอบเขตของกรณีดังกล่าวในการค้นหาโดยวิธี ATS

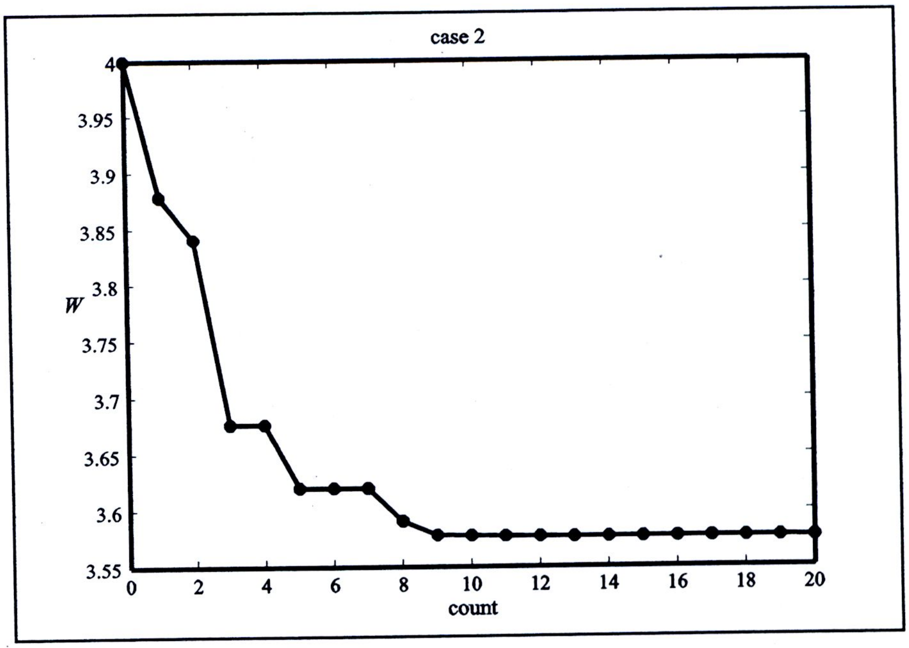
ตารางที่ 3.2 ผลการกำหนดขอบเขตการค้นหา กรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 4

| กรณี \ พารามิเตอร์ | | $K_{st}$ | $K_h$ | $W$ |
|---|---|---|---|---|
| กรณีที่ 1 | limits | $[1\times10^{-9}, 1\times10^{-6}]$ | $[1\times10^{-4}, 1\times10^{-1}]$ | 3.5800 |
| | result | $8.67\times10^{-7}$ | $\mathbf{1.00\times10^{-4}}$ | |
| กรณีที่ 2 | limits | $[1\times10^{-9}, 1\times10^{-6}]$ | $[1\times10^{-5}, 1\times10^{-1}]$ | 3.5765 |
| | result | $8.67\times10^{-7}$ | $\mathbf{1.00\times10^{-5}}$ | |
| กรณีที่ 3 | limits | $[5\times10^{-7}, 1\times10^{-6}]$ | $[1\times10^{-8}, 1\times10^{-5}]$ | 3.5764 |
| | result | $8.67\times10^{-7}$ | $\mathbf{1.00\times10^{-8}}$ | |
| กรณีที่ 4 | limits | $[5\times10^{-7}, 1\times10^{-6}]$ | $[7\times10^{-9}, 1\times10^{-7}]$ | 3.5764 |
| | result | $8.67\times10^{-7}$ | $4.46\times10^{-8}$ | |

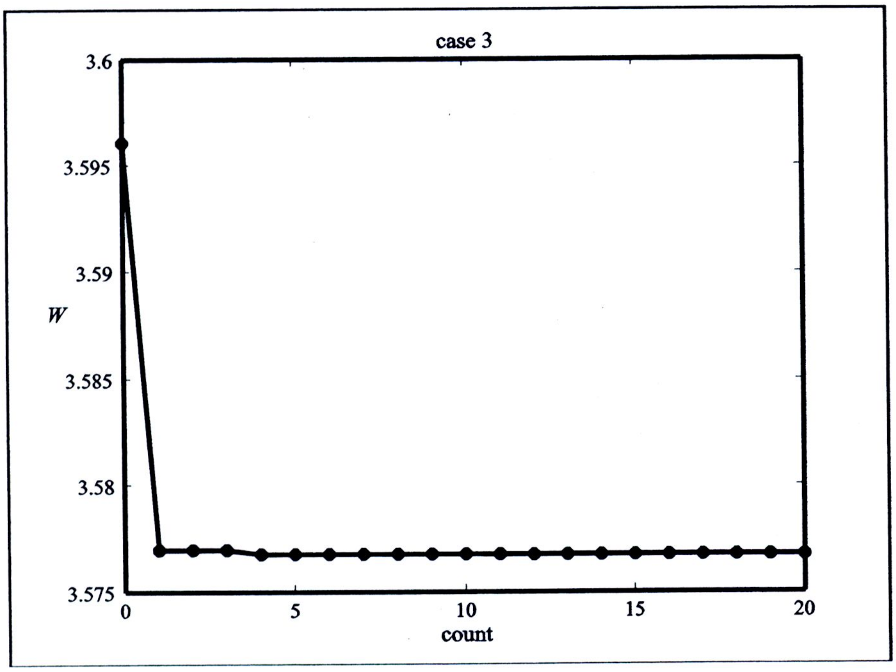
การปรับขอบเขตในแต่ละกรณีจะได้กราฟการลู่เข้าดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.12 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะสังเกตได้ว่าการลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและรูปที่ 3.13 คือ กราฟการลู่เข้ารวมของทั้ง 4 กรณี เปรียบเทียบกัน แสดงได้ดังนี้



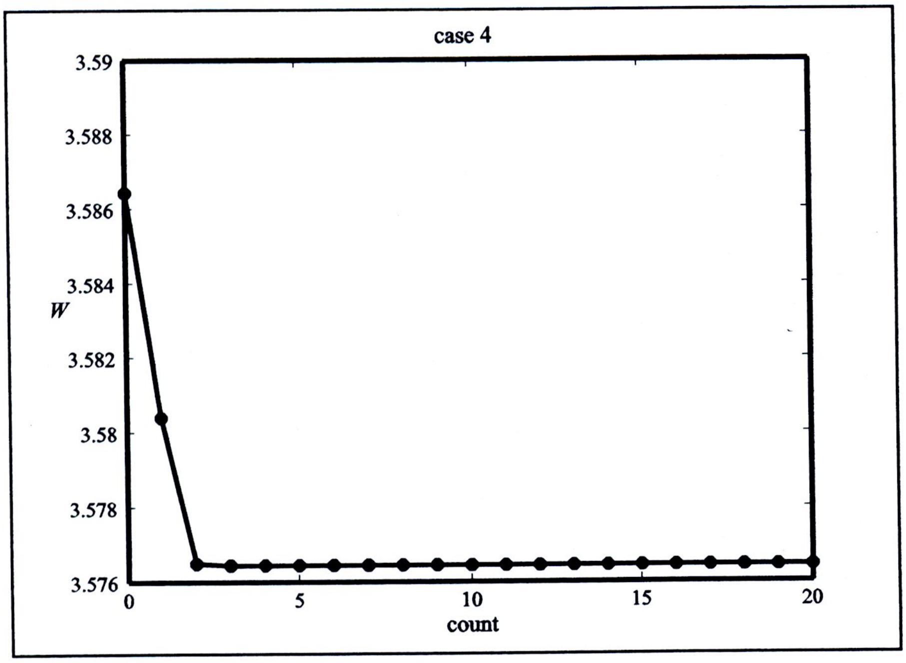

รูปที่ 3.9 การลู่เข้าหาคำตอบ *W* ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 1



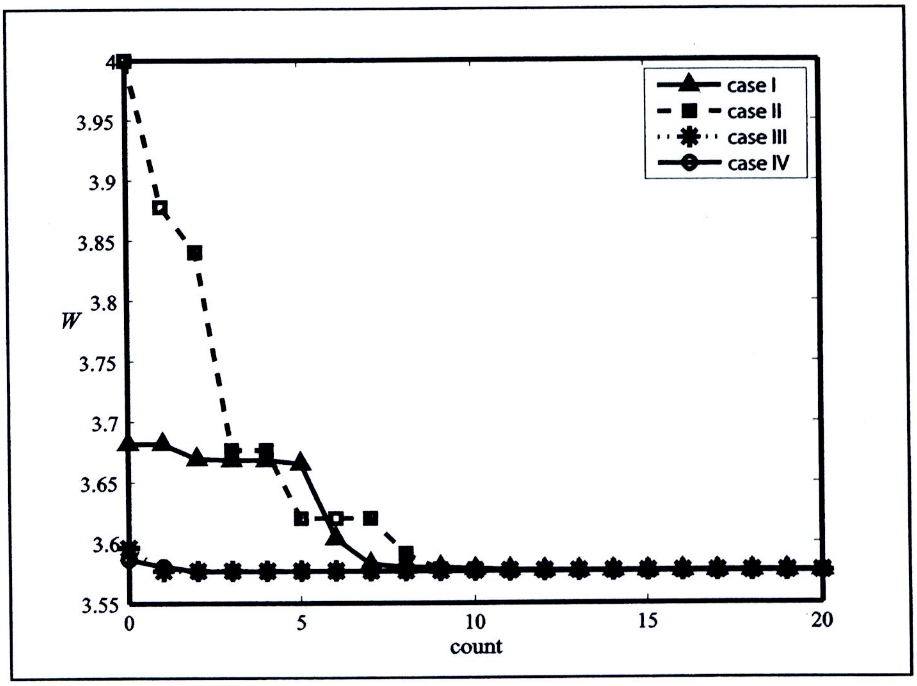

รูปที่ 3.10 การลู่เข้าหาคำตอบ *W* ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 2




รูปที่ 3.11 การลู่เข้าหาคำตอบ *W* ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 3




รูปที่ 3.12 การลู่เข้าหาคำตอบ *W* ของขอบเขตการค้นหากรณีที่ 4




รูปที่ 3.13 การลู่เข้าหาคำตอบ *W* ของขอบเขตการค้นหา

### 3.3.3 การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาด้วยวิธี ATS ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญด้วยกัน 4 ค่า ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธี ATS มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นสามารถพิจารณาผลการทดสอบพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า โดยใช้ขอบเขตของกรณีที่ 4 ได้ตามตารางที่ 3.3 ถึง ตารางที่ 3.6 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

| ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า *W* | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | $5.5\text{x}10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 3 | 1.1 |

ตารางที่ 3.3 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

| ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 0 |
| จำนวนรอบ | 6 | 1 | 1 | 1 | 6 | 3 | 2.74 |
| จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5766 | 3.5764 | 3.5765 | $8.4 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 6 | 2 | 6 | 3 | 1 | 4 | 2.3 |
| จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | $4.5 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 5 | 1 | 6 | 1 | 2 | 3 | 3.28 |
| จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5764 | 3.5764 | 3.5766 | 3.5765 | 3.5765 | $8.4 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 1 | 3 | 4 | 6 | 1 | 3 | 2.12 |
| จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5764 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5764 | $5.5 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 1 | 7 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2.51 |

ตารางที่ 3.4 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

| ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5766 | 3.5766 | 3.5765 | $8.4 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 6 | 4 | 7 | 9 | 7 | 7 | 1.82 |
| จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5766 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | $7.1 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 4 | 7 | 9 | 2 | 3 | 5 | 2.92 |
| จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5764 | 3.576 | 3.5765 | $7.1 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 6 | 3 | 1 | 3 | 6 | 4 | 2.17 |
| จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5766 | 3.5765 | 3.5765 | $7.1 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 7 | 1 | 1 | 1 | 8 | 4 | 4.71 |
| จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5764 | 3.5766 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | $8.4 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0.55 |
| จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.576 | 3.5766 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | $8.4 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 2 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 1.3 |

ตารางที่ 3.5 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

| ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5764 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5764 | 3.574 | 3.5764 | $4.5x10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 1 | 6 | 2 | 6 | 4 | 4 | 2.28 |
| ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2 | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | $5.5x10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 4 | 4 | 1 | 6 | 5 | 4 | 1.87 |
| ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3 | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5765 | 3.5765 | 3.5766 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | $7.1x10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 2 | 7 | 1 | 1 | 5 | 3 | 2.68 |
| ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4 | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5764 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5766 | 3.5765 | 3.5765 | $8.4x10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 1 | 7 | 1 | 8 | 6 | 5 | 2.88 |
| ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5 | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | $4.5x10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 7 | 2 | 6 | 6 | 1 | 4 | 2.7 |
| ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6 | | | | | | | |
| ค่า $W$ | 3.5764 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5764 | $5.5x10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 3 | 6 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2.19 |

ตารางที่ 3.6 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี

| ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1 | | | | | | | |
| ค่า *W* | 3.5766 | 3.5765 | 3.5766 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | $8.4 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0.89 |
| ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2 | | | | | | | |
| ค่า *W* | 3.5764 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5764 | $5.5 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 1 | 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1.22 |
| ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 | | | | | | | |
| ค่า *W* | 3.5764 | 3.5766 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | 3.5765 | $7.1 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 4 | 3 | 4 | 4 | 1 | 3 | 1.3 |
| ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4 | | | | | | | |
| ค่า *W* | 3.5764 | 3.5764 | 3.5764 | 3.5766 | 3.5765 | 3.5765 | $9.0 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1.76 |
| ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5 | | | | | | | |
| ค่า *W* | 3.5765 | 3.5765 | 3.5764 | 3.5764 | 3.5765 | 3.5765 | $5.5 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 0.89 |
| ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.6 | | | | | | | |
| ค่า *W* | 3.5765 | 3.5764 | 3.5764 | 3.5764 | 3.5764 | 3.5764 | $4.5 \times 10^{-5}$ |
| จำนวนรอบ | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0.89 |

จากตารางการทดสอบพารามิเตอร์ของ ATS ตามตารางที่ 3.3 ถึง ตารางที่ 3.6 ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การพิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ และส่วนที่ 2 การพิจารณาเกี่ยวกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมา ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้

*ส่วนที่ 1 การพิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม*

การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพิจารณาจากค่า *W* ควบคู่ไปกับจำนวนรอบ สามารถอธิบายได้ดังนี้

- จากตารางที่ 3.3 สังเกตได้ว่าค่า *W* ในกรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้น 60 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุดและจำนวนรอบก็น้อยที่สุดด้วย จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ

- จากตารางที่ 3.4 พบว่าค่า *W* มีค่าเท่ากันหมดทุกจำนวนคำตอบรอบข้าง จึงมาพิจารณาที่จำนวนรอบ ซึ่งพบว่าจำนวนรอบของจำนวนคำตอบรอบข้าง 50 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างค่านี้

- จากตารางที่ 3.5 สังเกตได้ว่าค่า *W* ในกรณีค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 และค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6 มีค่าเท่ากันและน้อยที่สุด จึงพิจาณาที่จำนวนรอบเป็นลำดับต่อมา พบว่าค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6 มีจำนวนรอบน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6

- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ 3.6 ค่าปรับลดรัศมีจะใช้หลักการเดียวกันกับการเลือกค่ารัศมีเริ่มต้น จึงได้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2

*ส่วนที่ 2 การพิจารณาเกี่ยวกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : SD)*

การพิจารณาค่า SD คือ การพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีการแกว่งหรือกระจายตัวมากน้อยเท่าใด หากข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ใกล้ค่าเฉลี่ยมาก ค่า SD จะมีค่าน้อย ในทางกลับกันถ้าข้อมูลแต่ละจุดอยู่ห่างไกลจากค่าเฉลี่ย ค่า SD จะมีค่ามาก และเมื่อข้อมูลทุกตัวมีค่าเท่ากันหมด ค่า SD จะเท่ากับศูนย์ คือไม่มีการกระจายตัว การพิจารณาค่า SD ของแต่ละตาราง สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ตารางที่ 3.3 เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ ค่า SD ของค่า *W* เท่ากับ $5.5\text{x}10^{-5}$ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นข้อมูลของค่า *W* จึงมีการกระจายตัวไม่มากนัก และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 2.51 จะเห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัว เพราะข้อมูลบางจุดมีค่ากระโดดขึ้นมากกว่าข้อมูลจุดอื่น

- ตารางที่ 3.4 เลือกจำนวนคำตอบรอบข้าง 50 คำตอบ ค่า SD ของค่า *W* เท่ากับ $8.4\text{x}10^{-5}$ มีค่าน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นข้อมูลของค่า *W* จึงมีการกระจายตัวน้อยมาก และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 0.55 พบว่าข้อมูลยังมีการกระจายตัว แต่น้อยมาก

- ตารางที่ 3.5 เลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6 ค่า SD ของค่า *W* เท่ากับ $5.5\text{x}10^{-5}$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่า *W* จึงแทบไม่มีการกระจายตัว และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 2.19 ข้อมูลมีการกระจายตัว เพราะข้อมูลบางจุดมีค่าห่างจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

- ตารางที่ 3.6 ใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2 ค่า SD ของค่า *W* เท่ากับ $5.5\text{x}10^{-5}$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่า *W* จึงแทบไม่มีการกระจายตัวเช่นเดียวกับตารางอื่น ๆ ที่กล่าวไปแล้ว และค่า SD ของจำนวนรอบ เท่ากับ 1.22 ข้อมูลมีการกระจายตัว แต่ข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกันค่า SD จึงมีค่าไม่มาก

การเลือกค่าพารามิเตอร์ของ ATS ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับค่า $W$ และจำนวนรอบเป็นสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงพิจารณาผลจากส่วนที่ 1 เป็นสำคัญและจากการพิจารณาในส่วนที่ 1 สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 60 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 50 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 6 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.2 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวของ ATS ไปทดสอบหาพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียจำนวน 1000 รอบ/ครั้ง เพื่อหาคำตอบสุดท้าย ซึ่งพิจารณาได้จากตารางที่ 3.7 ดังนี้

ตารางที่ 3.7 ผลจากการทดสอบจำนวน 1000 รอบ/ครั้ง

| จำนวนครั้ง | $K_{st}$ | $K_h$ | $W$ |
|---|---|---|---|
| 1 | $8.68\times10^{-7}$ | $2.89\times10^{-8}$ | 3.5764 |
| 2 | $8.68\times10^{-7}$ | $5.1\times10^{-8}$ | 3.5764 |
| 3 | $8.68\times10^{-7}$ | $5.34\times10^{-8}$ | 3.5764 |
| 4 | $8.68\times10^{-7}$ | $4.28\times10^{-8}$ | 3.5764 |
| 5 | $8.68\times10^{-7}$ | $6.23\times10^{-8}$ | 3.5764 |
| ค่าเฉลี่ย | $8.68\times10^{-7}$ | $4.77\times10^{-8}$ | 3.5764 |

จากตารางที่ 3.7 ทำการทดสอบ 1000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จึงสรุปได้ว่า ค่า $K_{st}$ เท่ากับ $8.68\times10^{-7}$ และ ค่า $K_h$ เท่ากับ $4.77\times10^{-8}$ แต่ก่อนที่จะนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ไปใช้กับสมการกำลังงานสูญเสีย จำเป็นต้องทำการตรวจสอบผลการค้นหาซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

### 3.3.4 การตรวจสอบผลการค้นหา

การตรวจสอบผลการค้นหา คือ การนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี ATS ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.3.3 ตารางที่ 3.7 มาทำการทดสอบความถูกต้องกับข้อมูล 90% และ 110% ของความเร็วพิกัด ซึ่งข้อมูล 2 ชุดนี้ไม่ได้นำไปใช้ในการค้นหาด้วยวิธี ATS การตรวจสอบทำได้โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปแทนลงในสมการกำลังงานสูญเสีย สมการที่ (2.25) แล้วนำค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ตามตารางที่ (3.1) ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องแสดงได้ดังตารางที่ 3.8 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบความถูกต้องของคำตอบจากการระบุเอกลักษณ์

| % ของความเร็วพิกัด | $P_{loss(experiment)}$ (W) | $P_{loss(computation)}$ (W) | *% error* |
|---|---|---|---|
| 90 | 166.11 | 166.93 | 0.49 |
| 110 | 149.76 | 143.77 | 4 |

จากตารางที่ 3.8 ค่า *% error* จากการเปรียบเทียบของข้อมูลทั้ง 2 ชุด อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS ตามตารางที่ 3.7 และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่า แทนลงในสมการที่ (2.25) จะเป็นดังสมการที่ (3.8) ดังนี้

$$P_{loss} = 15.99 i_a^2 + 735.43 i_f^2 + 2 i_a + (7.92\times 10^{-5}) i_a^2 \omega^2 + (4.77\times 10^{-8}) i_f^2 \omega \qquad (3.8)$$

## 3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง โดยจะพบว่า การกำหนดขอบเขตของการค้นหา และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธี ATS ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการค้นหา โดยค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่เหมาะสมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 60 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 50 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 6 และค่าปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.2 โดยค่าของพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการกำลังงานสูญเสียแล้วพบว่าค่ากำลังงานสูญเสียที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังงานสูญเสียที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ ดังนั้นจากการดำเนินงานทั้งหมดในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียด้วยวิธี ATS ให้ผลเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง และจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้เพื่อคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียเพื่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 4