

บทที่ 5

ผลและการอภิปรายผล

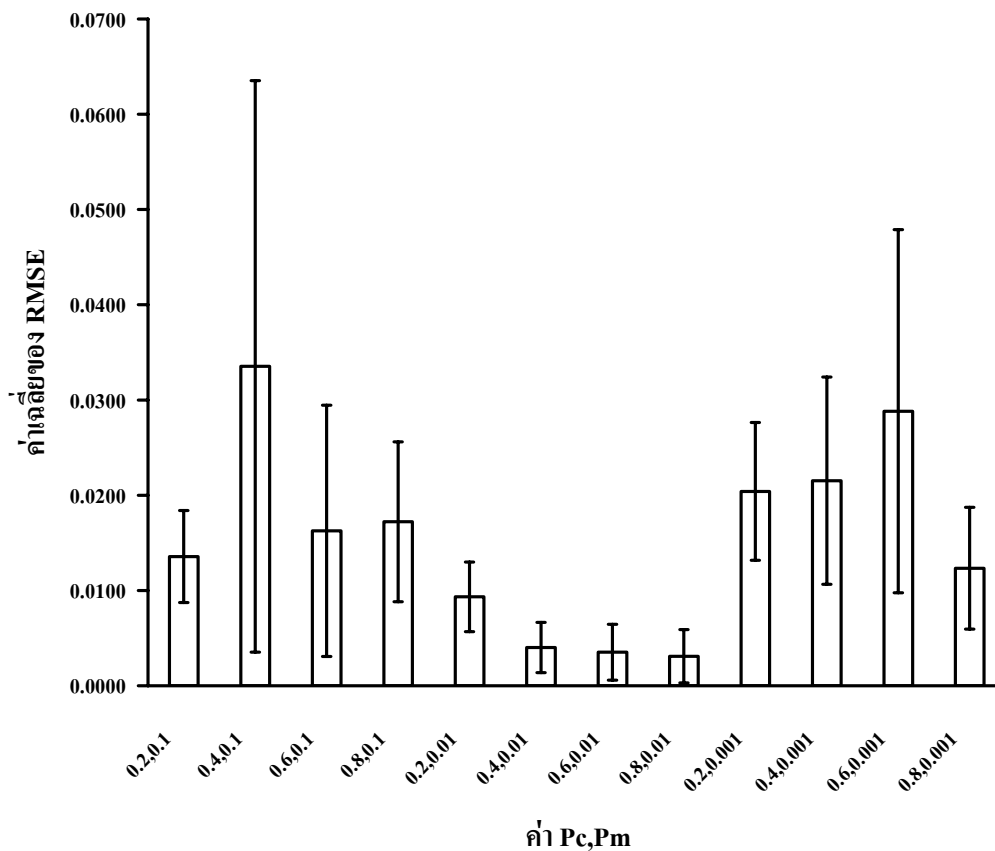
5.1 การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าพารามิเตอร์จากกราฟกระแสและศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์

การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าพารามิเตอร์จากกราฟกระแสและศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จะเริ่มต้นด้วยการพิจารณาหาภาวะที่เหมาะสมในการคำนวณด้วยเจเนติกอัลกอริทึมโดยพิจารณาหาความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์ (P_c) และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (P_m) ให้ได้ผลการคำนวณที่ดีที่สุด และหาจำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์ที่เหมาะสมโดยทำการทดลองใช้จำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์เท่ากับ 1, 2 และ 3 แล้วทำการทดลองเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในกรณีที่เป็นอุดมคติและในกรณีทั่วไป จากเงื่อนไขการคำนวณที่เหมาะสมที่ได้

5.1.1 การพิจารณาหาความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์ค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ที่เหมาะสม

ในการหาค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์ค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ที่เหมาะสมในการคำนวณด้วยเจเนติกอัลกอริทึม ได้ทำการทดลองเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , J_{01} , J_{02} , ρ_e , ρ_{sh} , n_1 และ n_2 โดยใช้ค่าขอบเขตของการค้นหาเท่ากับ ± 100 เฟอร์เซนต์ ของค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นในหัวข้อ 4.4 ซึ่งจะใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 150 ประชากร และใช้รุ่นในการคำนวณ 200 รุ่น

ผลการทดลองพบว่าค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ที่ให้ผลการคำนวณที่ดีที่สุด คือ 0.8 และ 0.01 ตามลำดับ (ภาพประกอบ 5.1) ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์เท่ากับ 0.8 จะให้ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMSE ที่มีค่าน้อยกว่ากรณีอื่นในทุกค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ที่พิจารณา ส่วนในกรณีค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.01 จะให้ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMSE ที่ดีกว่าการใช้ค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์อื่นที่พิจารณาอย่างชัดเจนและจะให้ผลการคำนวณที่ดีที่สุดเมื่อค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์เท่ากับ 0.8

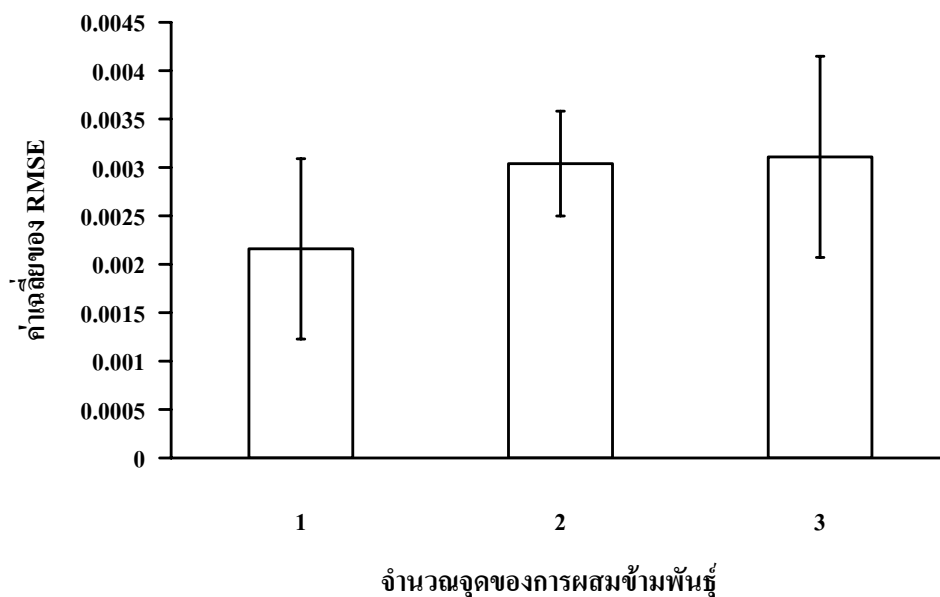


ภาพประกอบ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่า RMSE กับค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์ (P_c) และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (P_m)

5.1.2 การพิจารณาหาจำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์ที่เหมาะสม

ในการหาจำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์ที่เหมาะสมในการคำนวณด้วยเจเนติกอัลกอริทึม ได้ทำการทดลองเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , J_{01} , J_{02} , ρ_e , ρ_{sh} , n_1 และ n_2 โดยใช้ค่าขอบเขตของการค้นหาเท่ากับ ± 100 เปอร์เซนต์ ของค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นในหัวข้อ 4.4 ใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.8 และ 0.01 ตามลำดับ ใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 150 ประชากร และใช้รุ่นในการคำนวณ 200 รุ่น

ผลการทดลองพบว่าจำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์จำนวน 1 จุด ให้ผลการคำนวณที่ดีที่สุด (ภาพประกอบ 5.2) เนื่องจากให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด และยังพบว่า การเพิ่มจำนวนจุดของการผสมข้ามพันธุ์มีแนวโน้มที่จะไม่ส่งผลดีต่อการคำนวณ



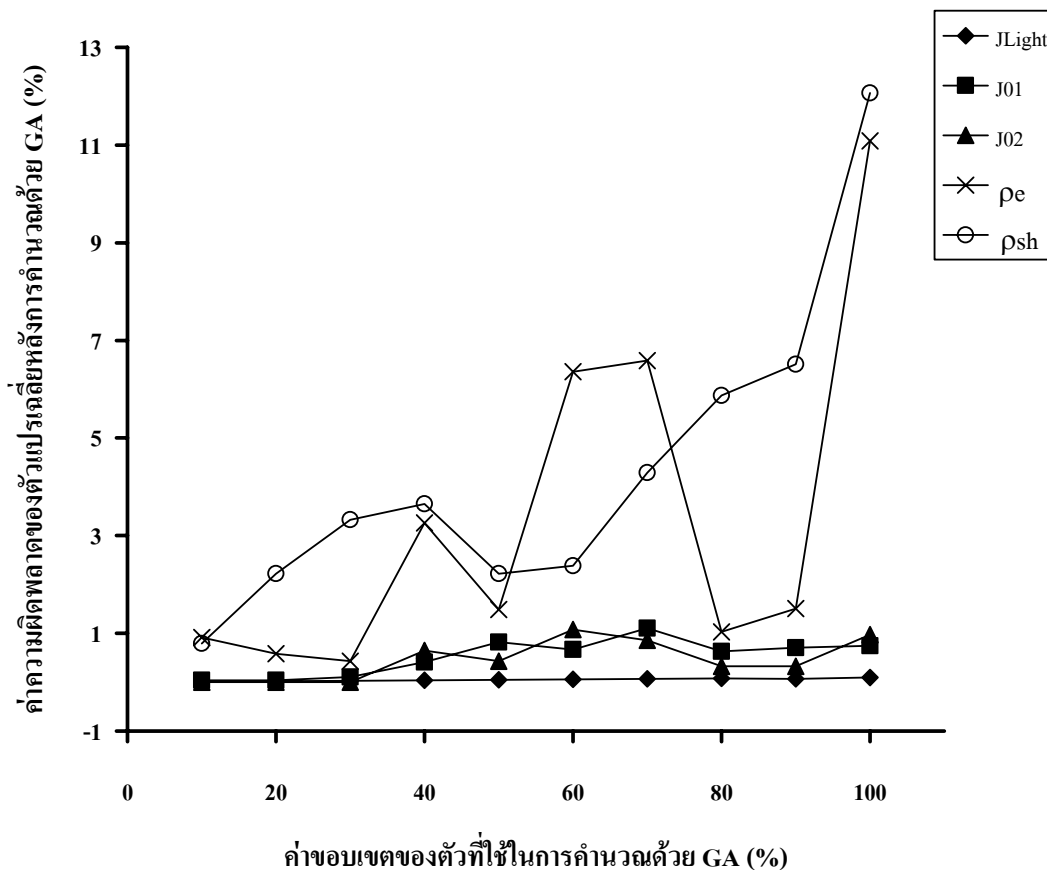
ภาพประกอบ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่า RMSE กับจำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์

5.1.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่เป็นอุดมคติ

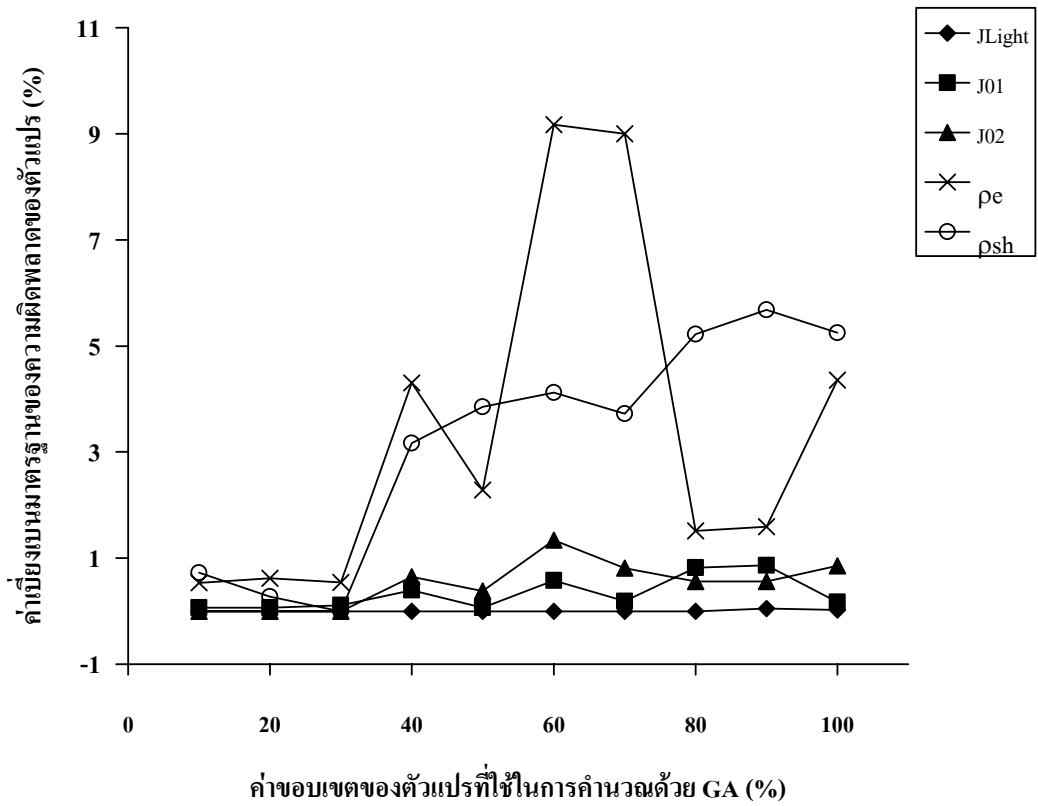
ในการทดลองจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในช่วงขอบเขต ± 10 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึง ± 100 เปอร์เซ็นต์ ของค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นในหัวข้อ 4.4 ซึ่งในกรณีที่เป็นอุดมคตินี้สามารถกำหนดให้ค่าตัวประกอบของไดโอดทั้งสองค่าเป็น $n_1 = 1$ และ $n_2 = 2$ โดยในการทดลองจะใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.8 และ 0.01 ตามลำดับ ใช้จำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์ 1 จุด ใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 150 และใช้รุ่นในการคำนวณ 200 รุ่น

จากผลการทดลองที่ได้ (ภาพประกอบ 5.3, ภาพประกอบ 5.4 และภาพประกอบ 5.5) พบว่าค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ค้นหาด้วยเจเนติกอัลกอริทึมเมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้อยู่ในช่วง 0.00 ถึง 12.06 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการค้นหาในช่วงขอบเขต ± 10 ถึง ± 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , J_{01} และ J_{02} มีค่าความผิดพลาดต่ำก็อยู่ในช่วง 0.00 ถึง 1.11 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ส่วนค่าพารามิเตอร์ ρ_e และ ρ_{sh} จะมีค่าความผิดพลาดไม่มากนักก็อยู่ในช่วง 0.43 ถึง 6.59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค้นหาในช่วง ± 10 ถึง ± 90 เปอร์เซ็นต์ และค่าความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ ρ_e และ ρ_{sh} มากที่สุดเมื่อทำการค้นหาช่วง ± 100 เปอร์เซ็นต์ คือเท่ากับ 11.08 และ 12.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดมีลักษณะคล้ายกับค่าความผิดพลาดที่ได้คือมีค่าน้อยในกรณีของค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , J_{01} และ J_{02} และมีค่ามากกว่าในกรณีของค่าพารามิเตอร์ ρ_e และ ρ_{sh} ส่วนค่า RMSE จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ใน

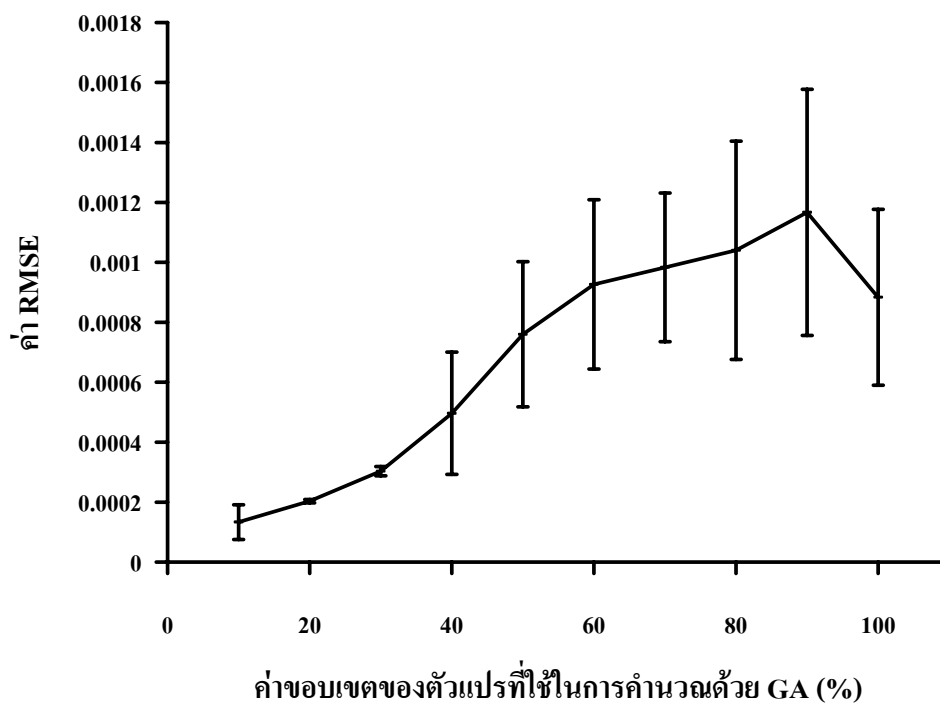
การค้นหาค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาในช่วงขอบเขต ± 10 ถึง ± 100 เปอร์เซ็นต์
แสดงไว้ในตาราง 5.1



ภาพประกอบ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับค่าขอบเขตของค่าพารามิเตอร์
ของแบบจำลองการรวบรวมพาหะของजूด้านที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ใน
กรณีที่เป็นอุดมคติซึ่งกำหนดให้ $n_1 = 1$ และ $n_2 = 2$



ภาพประกอบ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์กับค่าขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการรวบรวมพาหะของข้าวต้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่เป็นอุดมคติซึ่งกำหนดให้ $n_1 = 1$ และ $n_2 = 2$



ภาพประกอบ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMSE กับค่าขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการรวบรวมพาหะของข้าวด้งที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่เป็นอุดมคติซึ่งกำหนดให้ $n_1 = 1$ และ $n_2 = 2$

ตาราง 5.1 (a) ค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , J_{01} และ J_{02} ที่ได้จากการคำนวณด้วยเจเนติกอัลกอริทึมที่ค่าขอบเขตของตัวแปรต่างกัน ในกรณีที่เป็นอุดมคติซึ่งกำหนดให้ $n_1 = 1$ และ $n_2 = 2$

ขอบเขต ของตัวแปร (±%)	ตัวแปรของแบบจำลองการรวบรวมพาหะของข้าวด้่านที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์		
	J_{Light}	J_{01}	J_{02}
10	-290.03 ± 0.00	$9.03 \times 10^{-8} \pm 0.10 \times 10^{-8}$	$3.10 \times 10^{-3} \pm 0.00 \times 10^{-3}$
20	-289.94 ± 0.00	$9.00 \times 10^{-8} \pm 0.01 \times 10^{-8}$	$3.10 \times 10^{-3} \pm 0.00 \times 10^{-3}$
30	-289.97 ± 0.10	$9.01 \times 10^{-8} \pm 0.01 \times 10^{-8}$	$3.10 \times 10^{-3} \pm 0.00 \times 10^{-3}$
40	-289.96 ± 0.13	$8.96 \times 10^{-8} \pm 0.04 \times 10^{-8}$	$3.12 \times 10^{-3} \pm 0.02 \times 10^{-3}$
50	-289.95 ± 0.16	$9.07 \times 10^{-8} \pm 0.01 \times 10^{-8}$	$3.09 \times 10^{-3} \pm 0.01 \times 10^{-3}$
60	-289.83 ± 0.00	$9.06 \times 10^{-8} \pm 0.05 \times 10^{-8}$	$3.08 \times 10^{-3} \pm 0.04 \times 10^{-3}$
70	-290.20 ± 0.00	$8.90 \times 10^{-8} \pm 0.02 \times 10^{-8}$	$3.09 \times 10^{-3} \pm 0.04 \times 10^{-3}$
80	-290.08 ± 0.27	$8.94 \times 10^{-8} \pm 0.07 \times 10^{-8}$	$3.11 \times 10^{-3} \pm 0.02 \times 10^{-3}$
90	-290.09 ± 0.30	$8.96 \times 10^{-8} \pm 0.10 \times 10^{-8}$	$3.11 \times 10^{-3} \pm 0.02 \times 10^{-3}$
100	-290.03 ± 0.33	$9.01 \times 10^{-8} \pm 0.08 \times 10^{-8}$	$3.08 \times 10^{-3} \pm 0.04 \times 10^{-3}$

ตาราง 5.1 (b) ค่าพารามิเตอร์ ρ_e , ρ_{sh} และค่า RMSE ที่ได้จากการคำนวณด้วยเจเนติก

อัลกอริทึมที่ค่าขอบเขตของตัวแปรต่างกัน ในกรณีที่เป็นอุดมคติซึ่งกำหนดให้ $n_1 = 1$

และ $n_2 = 2$

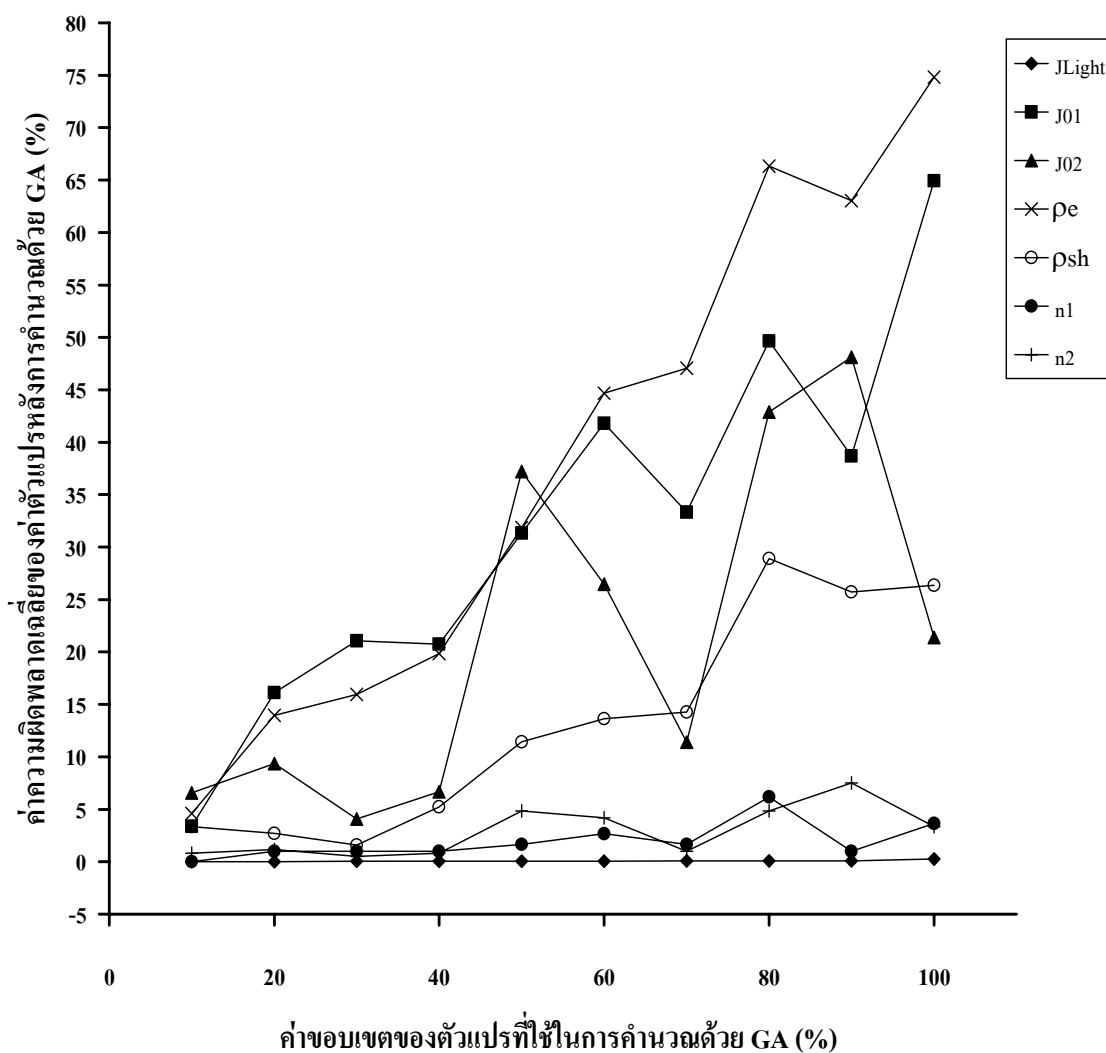
ขอบเขต ของตัวแปร (±%)	ตัวแปรของแบบจำลองการรวบรวมพาหะของข้าวด้งที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์		
	ρ_e	ρ_{sh}	RMSE
10	39.63 ± 0.21	$2.08 \times 10^{-1} \pm 0.02 \times 10^{-1}$	$1.33 \times 10^{-4} \pm 0.54 \times 10^{-4}$
20	40.23 ± 0.25	$2.15 \times 10^{-1} \pm 0.01 \times 10^{-1}$	$2.07 \times 10^{-4} \pm 0.06 \times 10^{-4}$
30	40.11 ± 0.27	$2.12 \times 10^{-1} \pm 0.08 \times 10^{-1}$	$3.02 \times 10^{-4} \pm 0.17 \times 10^{-4}$
40	39.40 ± 2.09	$2.18 \times 10^{-1} \pm 0.07 \times 10^{-1}$	$4.97 \times 10^{-4} \pm 2.04 \times 10^{-4}$
50	39.40 ± 0.91	$2.05 \times 10^{-1} \pm 0.08 \times 10^{-1}$	$7.62 \times 10^{-4} \pm 2.47 \times 10^{-4}$
60	42.39 ± 3.81	$2.15 \times 10^{-1} \pm 0.09 \times 10^{-1}$	$9.28 \times 10^{-4} \pm 2.8 \times 10^{-4}$
70	42.64 ± 3.60	$2.01 \times 10^{-1} \pm 0.08 \times 10^{-1}$	$9.84 \times 10^{-4} \pm 2.51 \times 10^{-4}$
80	40.41 ± 0.61	$2.12 \times 10^{-1} \pm 0.19 \times 10^{-1}$	$10.38 \times 10^{-4} \pm 3.63 \times 10^{-4}$
90	39.74 ± 0.92	$2.10 \times 10^{-1} \pm 0.21 \times 10^{-1}$	$11.67 \times 10^{-4} \pm 4.08 \times 10^{-4}$
100	42.78 ± 4.57	$2.10 \times 10^{-1} \pm 0.33 \times 10^{-1}$	$8.81 \times 10^{-4} \pm 2.92 \times 10^{-4}$

5.1.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีทั่วไป

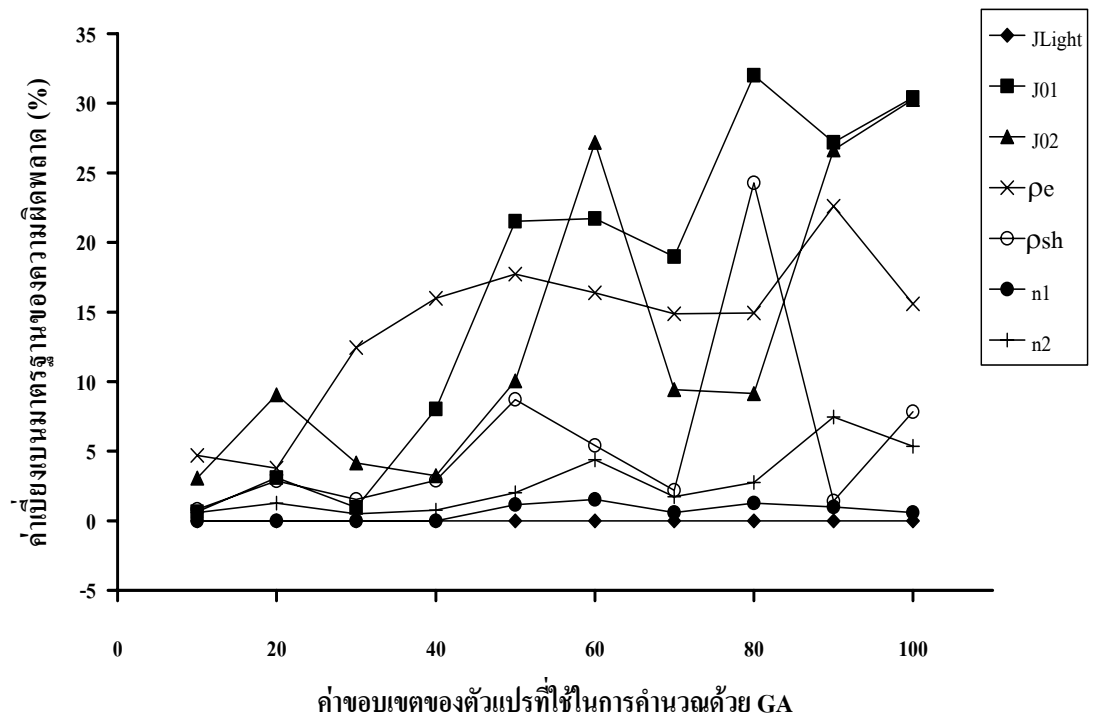
ในการทดลองจะทำการค้นหาพารามิเตอร์ในช่วงขอบเขต ± 10 ไปจนถึง ± 100 เปอร์เซ็นต์ ของค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดขึ้นในหัวข้อ 4.4 โดยจะพิจารณาค่า n_1 และ n_2 ด้วย ในการทดลองจะใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุและค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.8 และ 0.01 ตามลำดับ ใช้จำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ 1 จุด และใช้จำนวนประชากรในการคำนวณเท่ากับ 150 ประชากร โดยใช้รุ่นในการคำนวณ 200 รุ่น

ผลการทดลอง (ภาพประกอบ 5.6, ภาพประกอบ 5.7 และภาพประกอบ 5.8) พบว่า ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ค้นหาด้วยเจเนติกอัลกอริทึมเมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้อยู่ในช่วง 0.00 ถึง 66.33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค้นหาในช่วงขอบเขต ± 10 ถึง ± 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , n_1 และ n_2 มีค่าความผิดพลาดต่ำคืออยู่ในช่วง

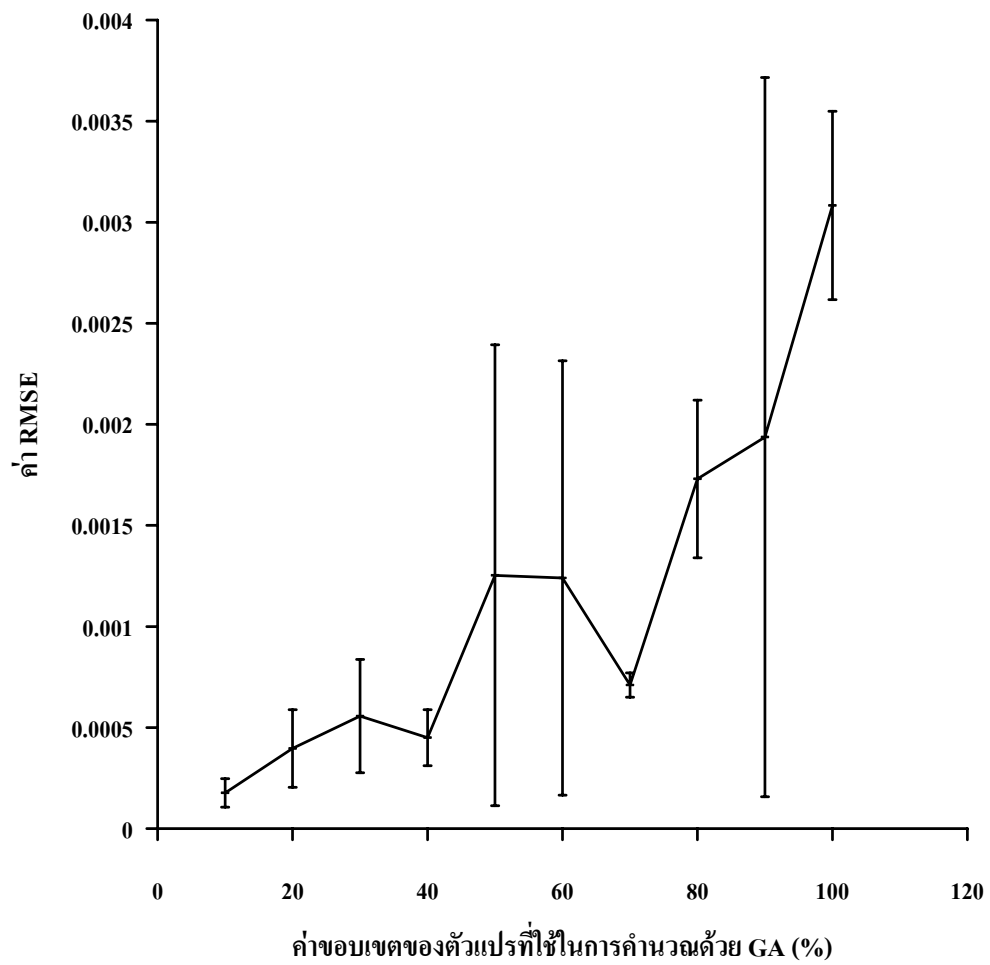
0.00 ถึง 7.50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าพารามิเตอร์ J_{01} , J_{02} , ρ_e และ ρ_{sh} มีค่าความผิดพลาดมากกว่าคืออยู่ในช่วง 1.59 ถึง 66.33 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ J_{02} และ ρ_{sh} มีค่าความผิดพลาดไม่มากนักในช่วงขอบเขตการค้นหา ± 10 ถึง ± 40 เปอร์เซ็นต์ คือ 4.09 ถึง 9.35 เปอร์เซ็นต์ และ 1.59 ถึง 5.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดมีลักษณะเหมือนกับค่าความผิดพลาดที่ได้คือมีค่าน้อยในกรณีของค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , n_1 และ n_2 และมีค่ามากกว่าในกรณีของค่าพารามิเตอร์ J_{01} , J_{02} , ρ_e และ ρ_{sh} ส่วนค่า RMSE จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าขอบเขตในการค้นหาเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาในช่วงขอบเขต ± 10 ถึง ± 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงไว้ในตาราง 5.2



ภาพประกอบ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดกับค่าขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีทั่วไปซึ่งพิจารณาค่า n_1 และ n_2 ด้วย



ภาพประกอบ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดกับค่าขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีทั่วไปซึ่งพิจารณาค่า n_1 และ n_2 ด้วย



ภาพประกอบ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMSE กับค่าขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีทั่วไปซึ่งพิจารณาค่า n_1 และ n_2 ด้วย

ตาราง 5.2 (a) ค่าพารามิเตอร์ J_{Light} , J_{01} , J_{02} และ ρ_e ที่ได้จากการคำนวณด้วยเจเนติกอัลกอริทึม
ที่ค่าขอบเขตของตัวแปรต่างกัน ในกรณีทั่วไปซึ่งพิจารณาค่า n_1 และ n_2 ด้วย

ขอบเขต ของตัวแปร (±%)	ตัวแปรของแบบจำลองการรวบรวมพาหะของข้าวด้่านที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์			
	J_{Light}	J_{01}	J_{02}	ρ_e
10	-290.03 ± 0.00	9.3x10 ⁻⁸ ± 0.06x10 ⁻⁸	2.90x10 ⁻³ ± 0.10x10 ⁻³	38.40 ± 2.17
20	-289.98 ± 0.07	9.28x10 ⁻⁸ ± 1.76x10 ⁻⁸	2.81x10 ⁻³ ± 0.28x10 ⁻³	37.75 ± 6.44
30	-290.09 ± 0.00	7.10x10 ⁻⁸ ± 0.08x10 ⁻⁸	3.03x10 ⁻³ ± 0.18x10 ⁻³	46.37 ± 4.78
40	-289.96 ± 0.13	10.90x10 ⁻⁸ ± 0.73x10 ⁻⁸	2.97x10 ⁻³ ± 0.22x10 ⁻³	32.07 ± 6.39
50	-289.86 ± 0.00	11.40x10 ⁻⁸ ± 2.68x10 ⁻⁸	3.33x10 ⁻³ ± 1.42x10 ⁻³	40.05 ± 17.13
60	-289.83 ± 0.00	9.72x10 ⁻⁸ ± 5.17x10 ⁻⁸	2.77x10 ⁻³ ± 1.25x10 ⁻³	36.66 ± 22.47
70	-289.93 ± 0.23	12.00x10 ⁻⁸ ± 1.71x10 ⁻⁸	2.99x10 ⁻³ ± 0.51x10 ⁻³	21.18 ± 5.95
80	-289.77 ± 0.00	4.53x10 ⁻⁸ ± 2.88x10 ⁻⁸	3.48x10 ⁻³ ± 1.59x10 ⁻³	34.38 ± 32.32
90	-289.91 ± 0.30	9.29x10 ⁻⁸ ± 4.91x10 ⁻⁸	5.04x10 ⁻³ ± 1.59x10 ⁻³	24.65 ± 26.12
100	-290.78 ± 0.00	12.1x10 ⁻⁸ ± 6.66x10 ⁻⁸	2.60x10 ⁻³ ± 1.08x10 ⁻³	10.08 ± 6.23

ตาราง 5.2 (b) ค่าพารามิเตอร์ ρ_{sh} , n_1 , n_2 และค่า RMSE ที่ได้จากการคำนวณด้วยเจเนติก อัลกอริทึมที่ค่าขอบเขตของตัวแปรต่างกัน ในกรณีทั่วไปซึ่งพิจารณาค่า n_1 และ n_2 ด้วย

ขอบเขต ของตัวแปร (±%)	ตัวแปรของแบบจำลองการรวบรวมพาหะของข้าวด้งที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์			
	ρ_{sh}	n_1	n_2	RMSE
10	$2.03 \times 10^{-1} \pm 0.02 \times 10^{-1}$	1.00 ± 0.00	1.98 ± 0.01	$1.77 \times 10^{-4} \pm 0.73 \times 10^{-4}$
20	$2.08 \times 10^{-1} \pm 0.05 \times 10^{-1}$	1.00 ± 0.01	1.98 ± 0.03	$3.95 \times 10^{-4} \pm 1.91 \times 10^{-4}$
30	$2.09 \times 10^{-1} \pm 0.05 \times 10^{-1}$	0.99 ± 0.00	2.00 ± 0.02	$5.56 \times 10^{-4} \pm 2.78 \times 10^{-4}$
40	$2.11 \times 10^{-1} \pm 0.15 \times 10^{-1}$	1.01 ± 0.00	1.98 ± 0.02	$4.48 \times 10^{-4} \pm 1.40 \times 10^{-4}$
50	$2.34 \times 10^{-1} \pm 0.36 \times 10^{-1}$	1.01 ± 0.02	2.00 ± 0.13	$12.55 \times 10^{-4} \pm 11.43 \times 10^{-4}$
60	$2.17 \times 10^{-1} \pm 0.36 \times 10^{-1}$	1.01 ± 0.06	1.96 ± 0.12	$12.38 \times 10^{-4} \pm 10.72 \times 10^{-4}$
70	$2.17 \times 10^{-1} \pm 0.36 \times 10^{-1}$	1.02 ± 0.01	1.98 ± 0.03	$7.10 \times 10^{-4} \pm 0.61 \times 10^{-4}$
80	$2.70 \times 10^{-1} \pm 0.52 \times 10^{-1}$	0.97 ± 0.04	2.00 ± 0.13	$17.34 \times 10^{-4} \pm 3.9 \times 10^{-4}$
90	$2.30 \times 10^{-1} \pm 0.62 \times 10^{-1}$	1.01 ± 0.01	1.94 ± 0.22	$19.40 \times 10^{-4} \pm 17.80 \times 10^{-4}$
100	$1.55 \times 10^{-1} \pm 0.16 \times 10^{-1}$	1.02 ± 0.04	1.93 ± 0.11	$30.86 \times 10^{-4} \pm 4.65 \times 10^{-4}$

5.2 ประยุกต์ใช้หลักการเจเนติกอัลกอริทึมในการออกแบบรูปแบบขั้วซึ่งมีรูปแบบธรรมดา

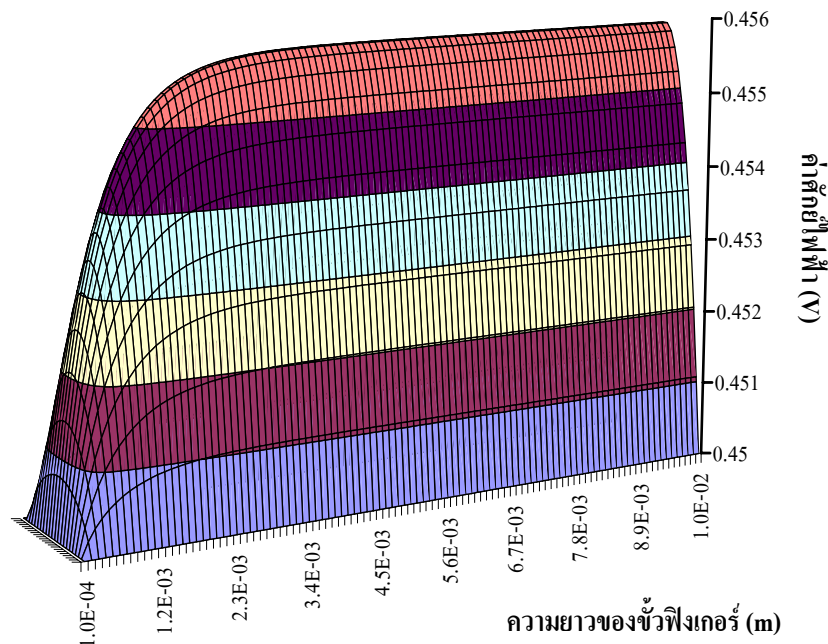
ในการออกแบบรูปแบบธรรมดาทั่วไปจะทำการทดลองโดยการพิจารณาผลกระทบของขั้วบัสบาร์ที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ แล้วทำการออกแบบเพื่อหาระยะระหว่างขั้วที่เหมาะสมของเซลล์ขนาด 10x10 เซนติเมตร โดยจะพิจารณาในกรณีที่ความกว้างขั้วฟิงเกอร์มีขนาดต่างกัน

5.2.1 ผลของขั้วบัสบาร์ที่มีต่อการรวบรวมพาหะ

ในการออกแบบรูปแบบขั้วที่มีรูปแบบธรรมดาทั่วไปซึ่งมีลักษณะรูปแบบขั้วเป็นชนิดก้างปลาหรือรูปแบบที่มีลักษณะเป็นกรอบที่มีขั้วบัสบาร์ที่ขอบทั้งสี่ด้านและมีขั้วบัสบาร์ย่อยหากมีการพิจารณาว่าขั้วบัสบาร์มีส่วนในการรวบรวมกระแสด้วยแล้วจะต้องพิจารณาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าบนชั้นอิมิตเตอร์ของเซลล์ในสองมิติ แต่หากพิจารณาว่าขั้วบัสบาร์ไม่มีส่วนในการรวบรวมกระแสก็สามารถพิจารณาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าบนชั้นอิมิตเตอร์ของเซลล์ได้ในหนึ่งมิติ ซึ่งการคำนวณจะกำหนดให้ระยะระหว่างขั้วฟิงเกอร์และความยาวของขั้วฟิงเกอร์เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ และพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นในหัวข้อ 4.4 จากผลการคำนวณในทั้งสองกรณี (ตาราง 5.3 และภาพประกอบ 5.9) พบว่าค่ากระแสไฟฟ้า, ค่ากำลังไฟฟ้าที่เซลล์ และค่าประสิทธิภาพที่ได้ในทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันมาก แม้ว่าค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานของชั้นอิมิตเตอร์ (P_e) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าบนชั้นอิมิตเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ณ จุดที่ห่างจากขั้ว ($P_{l,e}$) มีค่าแตกต่างกัน โดยกรณีที่ขั้วบัสบาร์มีส่วนในการรวบรวมกระแสด้วยจะมีค่าการสูญเสียทั้งสองค่าดังกล่าวน้อยกว่าเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าในบริเวณใกล้ๆ กับขั้วบัสบาร์มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ขั้วบัสบาร์ไม่มีส่วนในการรวบรวมกระแส แต่ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์มากนัก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลการรวบรวมกระแสของขั้วบัสบาร์

ตาราง 5.3 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้า (I_{out}) และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้ (P_{out}), ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานของชั้นอิมิตเตอร์ (P_e) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าบนชั้นอิมิตเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ณ จุดที่ห่างจากขั้ว ($P_{l,e}$) ของเซลล์ที่มีระยะระหว่างขั้วฟิงเกอร์และความยาวของขั้วฟิงเกอร์เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเซลล์ทำงานที่ศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์ ในกรณีที่มีการพิจารณาว่าขั้วสับบาร์มีส่วนกับไม่ส่วนในการรวบรวมกระแส

ค่าคุณสมบัติสมบัติ ของเซลล์	ขั้วสับบาร์ไม่รวบรวมกระแส	ขั้วสับบาร์รวบรวมกระแสด้วย
I_{out} (แอมแปร์)	-5.337×10^{-3}	-5.339×10^{-3}
P_{out} (วัตต์)	-2.402×10^{-3}	-2.403×10^{-3}
P_e (วัตต์)	2.189×10^{-5}	2.055×10^{-5}
$P_{l,e}$ (วัตต์)	5.479×10^{-6}	5.181×10^{-6}
ประสิทธิภาพของขั้ว(%)	99.32	99.36



ภาพประกอบ 5.9 การกระจายของศักย์ไฟฟ้าในกรณีที่ขั้วบัสบาร์มีส่วนในการรวบรวมกระแสของเซลล์ที่มีระยะระหว่างขั้วฟิงเกอร์และความยาวของขั้วฟิงเกอร์เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเซลล์ทำงานที่ศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์

5.2.2 การหาระยะระหว่างขั้วฟิงเกอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยเจเนติกอัลกอริทึม

การออกแบบขั้วด้านที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการพิจารณาเซลล์ขนาด 10×10 เซนติเมตร ที่มีค่าความกว้างของขั้วฟิงเกอร์เท่ากับ 100, 200 และ 300 ไมโครเมตร และมีขั้วบัสบาร์ที่มีความกว้างเท่ากับ 3 มิลลิเมตร จำนวนสองเส้น โดยจะพิจารณาว่าขั้วบัสบาร์ไม่มีส่วนในการรวบรวมกระแสจึงสามารถพิจารณาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าบนชั้นอิมิตเตอร์ของเซลล์ในหนึ่งมิติเพื่อคำนวณหาค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์ ซึ่งใช้เป็นค่าวัตถุประสงค์ในการออกแบบรูปแบบขั้วด้วยเจเนติกอัลกอริทึม ในการทดลองจะใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.8 และ 0.01 ตามลำดับ โดยใช้โครโมโซมที่มีความยาว 9 บิต เพื่อเข้ารหัสระยะระหว่างขั้วฟิงเกอร์ในช่วง 640 ถึง 5760 ไมโครเมตร ใช้จำนวนประชากรในการคำนวณเท่ากับ 20 และใช้รุ่นในการคำนวณ 200 รุ่น ผลการทดลองที่ได้ (ตาราง 5.4) พบว่าเซลล์ที่มีค่าความกว้างของขั้วฟิงเกอร์น้อยที่สุดคือเท่ากับ 100 ไมโครเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีระยะระหว่างขั้วฟิงเกอร์ที่ได้จากการออกแบบเท่ากับ 3.24×10^{-3} และพบว่าเซลล์ที่ใช้ขั้วฟิงเกอร์ที่มีความกว้างของขั้วมากกว่าจะมีระยะระหว่างขั้วฟิงเกอร์ที่ได้จากการออกแบบมากกว่าเซลล์ที่ใช้ขั้ว

ฟิงเกอร์ที่กว้างน้อยกว่า เนื่องจากเซลล์ที่มีความกว้างของขั้วฟิงเกอร์มากกว่ามีค่าการสูญเสียจากการบังเงาเพิ่มขึ้นจึงต้องชดเชยด้วยการขยายระยะระหว่างขั้วให้มากขึ้น และเนื่องในการออกแบบนี้ไม่สามารถพิจารณาค่าความกว้างของขั้วบัสบาร์ได้เนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงค่าความต้านทานของขั้วโลหะ

ตาราง 5.4 ผลของการออกแบบขั้วด้านที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาระยะระหว่างขั้ว

ฟิงเกอร์ที่ดีที่สุดด้วยเจเนติกอัลกอริทึมของเซลล์ขนาด 10x10 เซนติเมตร ที่มีค่าความกว้างของขั้วฟิงเกอร์เท่ากับ 100, 200 และ 300 ไมโครเมตร และมีขั้วบัสบาร์ที่มีความกว้างเท่ากับ 3 มิลลิเมตร จำนวนสองเส้น

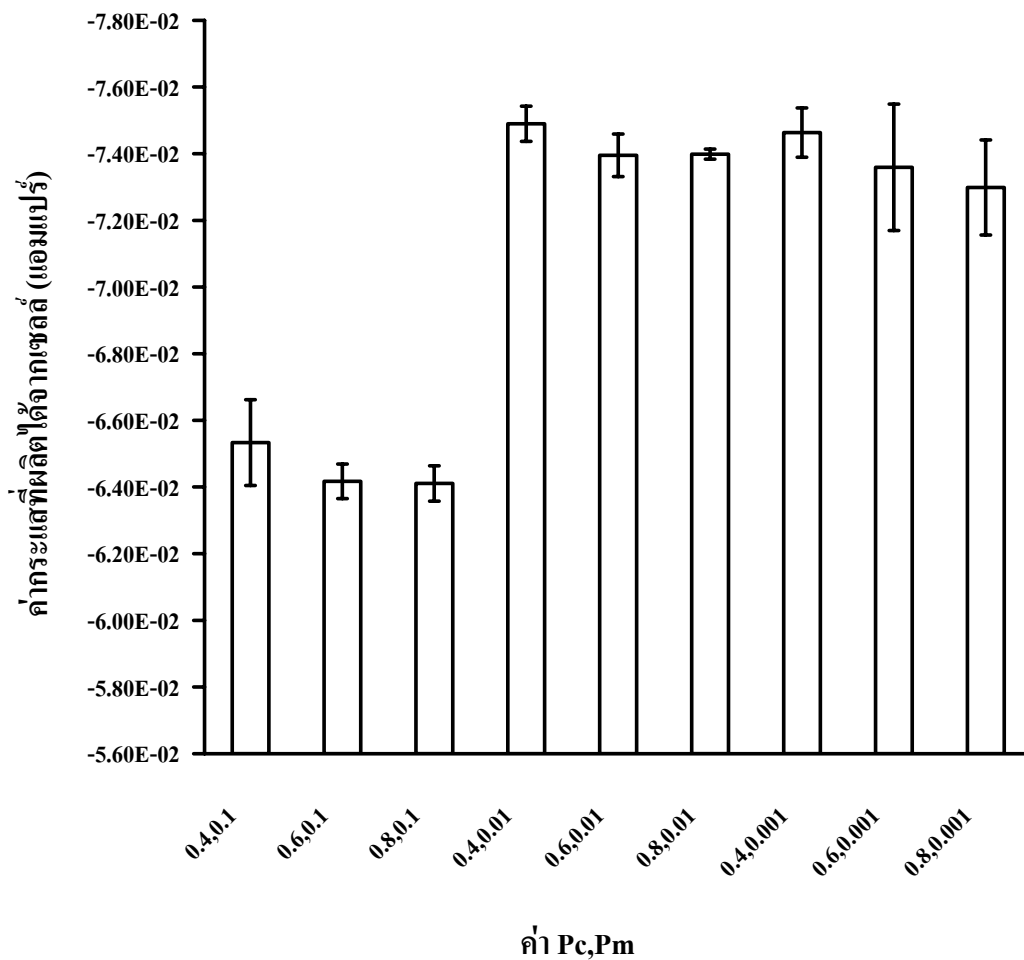
ค่าคุณสมบัติสมบัติ ของเซลล์	ความกว้างของขั้วฟิงเกอร์ (ไมโครเมตร)		
	100	200	300
I_{out} (แอมแปร์)	-2.39	-2.32	-2.26
P_{out} (วัตต์)	-1.07	-1.04	-1.02
P_x (วัตต์)	-1.21	-1.21	-1.21
P_e (วัตต์) (%)	2.20×10^{-2} (1.82)	2.69×10^{-2} (2.22)	3.19×10^{-2} (2.64)
$P_{l,e}$ (วัตต์) (%)	3.97×10^{-3} (0.33)	3.88×10^{-3} (0.32)	3.28×10^{-3} (0.27)
$P_{l,s}$ (วัตต์) (%)	8.46×10^{-3} (0.70)	1.04×10^{-2} (0.86)	1.20×10^{-2} (0.99)
P_s (วัตต์) (%)	1.07×10^{-1} (8.82)	1.32×10^{-1} (10.89)	1.51×10^{-1} (12.49)
ระยะระหว่างขั้ว ฟิงเกอร์ (เมตร)	3.24×10^{-3}	3.65×10^{-3}	4.04×10^{-3}
ประสิทธิภาพของขั้ว (%)	88.83	86.18	83.99

5.3 ประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการออกแบบรูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ

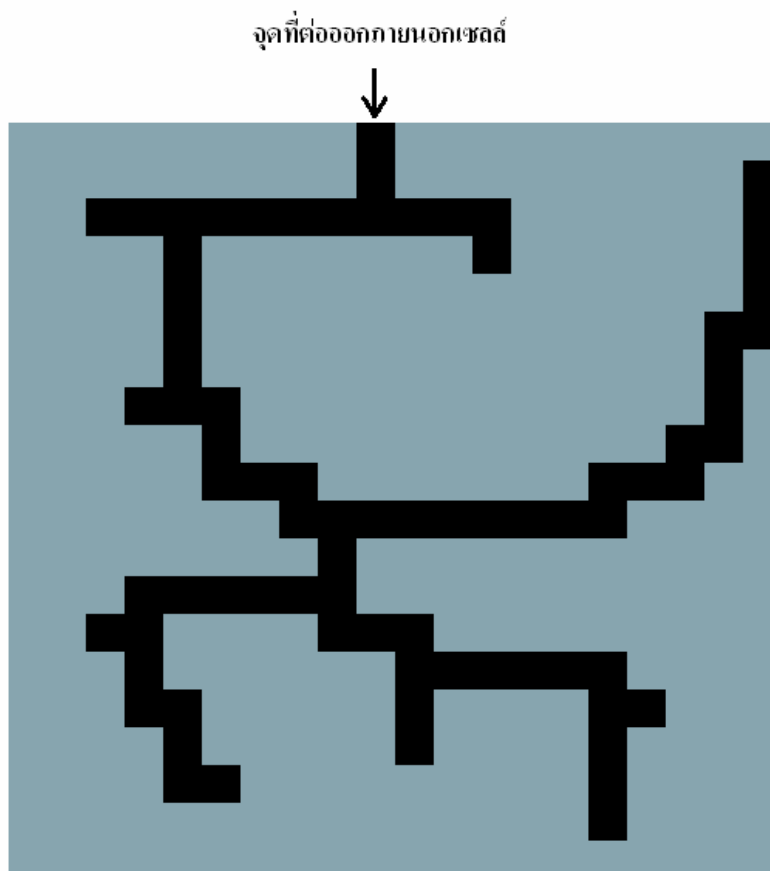
ในการออกแบบรูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ จะทำการทดลองโดยการแบบรูปแบบขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นในหัวข้อ 4.4 โดยจะพิจารณาออกแบบเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร ที่มีความกว้างของขั้ว 1 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการคำนวณเพื่อให้ได้รูปแบบขั้วที่ทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูงสุด แล้วเปรียบเทียบผลของการออกแบบรูปแบบขั้วที่ได้กับขั้วที่มีรูปแบบธรรมดาทั่วไปมีค่าความกว้างของขั้วฟิงเกอร์และความกว้างขั้วบัสบาร์มีเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

5.3.1 การหาค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ที่เหมาะสมกับการคำนวณ

ในการทดลองเพื่อพิจารณาหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการคำนวณ โดยใช้โครโมโซมเลขฐานสองที่มีความยาว 400 บิต เพื่อเข้ารหัสรูปแบบขั้วเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร ที่มีขั้วโลหะกว้าง 1 มิลลิเมตร ใช้จำนวนประชากรในการคำนวณเท่ากับ 50 และใช้รุ่นในการคำนวณเท่ากับ 300 รุ่น ผลการทดลองที่ได้พบว่า (ภาพประกอบ 5.10) เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ในการคำนวณเท่ากับ 0.4 และ 0.01 ตามลำดับ จะได้ค่าเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมซึ่งก็คือค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์มีค่ามากที่สุดคือ $-7.395 \times 10^{-2} \pm 0.064 \times 10^{-2}$ แอมแปร์ แต่เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.6 และ 0.001 ตามลำดับ จะได้รูปแบบขั้วที่ทำให้เซลล์ผลิตกระแสได้มากที่สุดเท่ากับ 7.578×10^{-2} แอมแปร์ ซึ่งมีประสิทธิภาพ 70.51 เปอร์เซ็นต์ (ภาพประกอบ 5.11) อย่างไรก็ตามจะเลือกใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.4 และ 0.01 ตามลำดับ ในการทดลองนี้ เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยของค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์มีค่ามากที่สุดจึงน่าจะมีโอกาสที่จะพบรูปแบบขั้วที่มีประสิทธิภาพมากกว่า



ภาพประกอบ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์กับค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์ (P_c) และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (P_m)

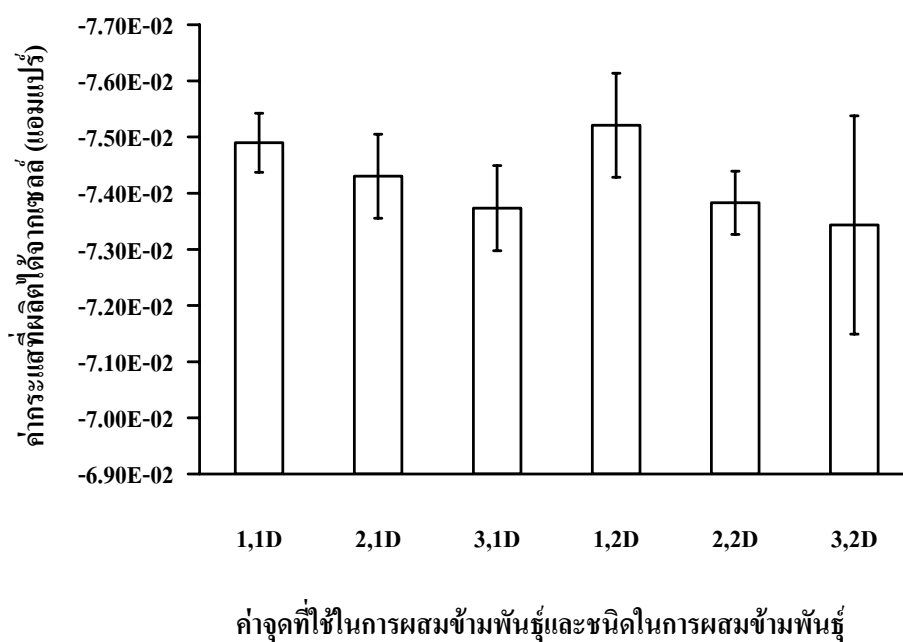


ภาพประกอบ 5.11 รูปแบบขั้วที่ผลิตกระแสได้มากที่สุดของเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร ที่มีค่าความกว้างของขั้วเท่ากับ 1 มิลลิเมตร เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.6 และ 0.001 ตามลำดับ โดยค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์ที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 7.578×10^{-2} แอมแปร์ ซึ่งมีประสิทธิภาพและค่าการบังเงาเท่ากับ 70.51 เปอร์เซ็นต์ และ 19.50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

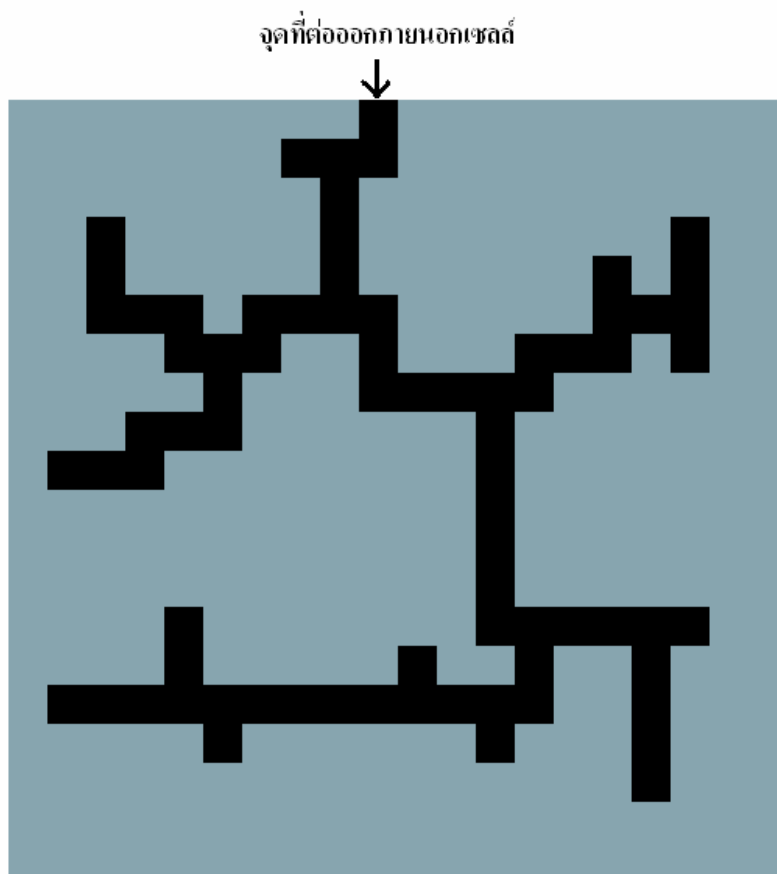
5.3.2 การพิจารณาประสิทธิภาพของการคำนวณระหว่างการใช้ผสมข้ามพันธุ์ชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์ในหนึ่งมิติและสองมิติ

ในการทดลองจะพิจารณาประสิทธิภาพของการคำนวณที่ใช้ผสมข้ามพันธุ์ชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์ในหนึ่งมิติและสองมิติ ซึ่งจะพิจารณาจำนวนจุดในการผสมข้ามพันธุ์เท่ากับ 1, 2 และ 3 ในทั้งสองกรณี โดยใช้โครโมโซมที่มีความยาว 400 บิต เพื่อเข้ารหัสรูปแบบขั้วเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร ที่มีขั้วโลหะกว้าง 1 มิลลิเมตร ใช้จำนวนประชากร

ในการคำนวณเท่ากับ 50 และใช้รุ่นในการคำนวณเท่ากับ 300 รุ่น ใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.4 และ 0.01 ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้ (ภาพประกอบ 5.12) พบว่าการผสมข้ามพันธุ์ที่เหมาะสมในการคำนวณคือการผสมข้ามพันธุ์ชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์ในสองมิติโดยใช้จุดในการผสมข้ามพันธุ์ 1 จุด ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ $7.52 \times 10^{-2} \pm 0.093 \times 10^{-2}$ แอมแปร์ และพบว่า การเพิ่มจุดในการผสมข้ามพันธุ์ไม่ส่งผลดีต่อการคำนวณในทั้งสองชนิดของการผสมข้ามพันธุ์ โดยรูปแบบขั้วที่ผลิตกระแสได้มากที่สุด (ภาพประกอบ 5.13) ก็ได้จากการใช้การผสมข้ามพันธุ์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น โดยจะได้ค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์เท่ากับ 7.60×10^{-2} แอมแปร์



ภาพประกอบ 5.12 แสดงผลประสิทธิภาพของการคำนวณระหว่างการใช้ผสมข้ามพันธุ์ชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์ในหนึ่งมิติ (1D) และสองมิติ (2D) ที่ใช้จุดในการผสมข้ามพันธุ์ 1, 2 และ 3 จุด

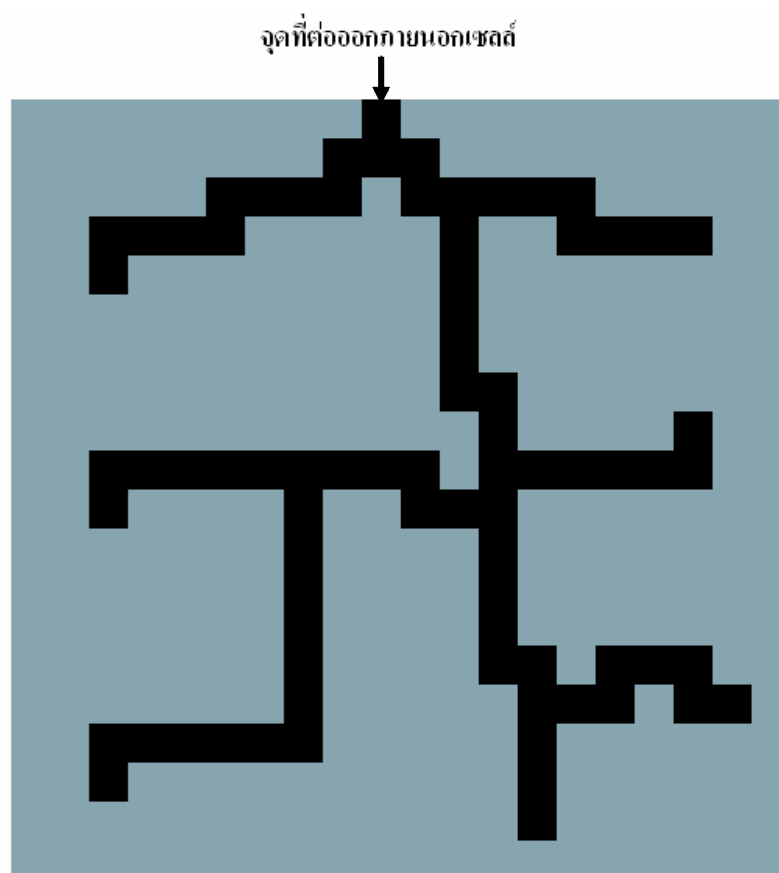


ภาพประกอบ 5.13 รูปแบบขั้วที่ผลิตกระแสได้มากที่สุดของเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร ที่มีค่าความกว้างขั้วเท่ากับ 1 มิลลิเมตร เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.4 และ 0.01 ตามลำดับ และการใช้ผสมข้ามพันธุ์ชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์ในสองมิติที่ใช้จุดในการผสมข้ามพันธุ์ 1 จุด โดยค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์ที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 7.60×10^{-2} แอมแปร์ มีประสิทธิภาพและค่าการบังเงาเท่ากับ 70.74 เปอร์เซ็นต์ และ 19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.3.3 การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการออกแบบรูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ ด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมในการคำนวณ

ในการทดลองเพื่อหารูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ ที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด จะใช้เงื่อนไขในการคำนวณที่ได้จากการทดลองข้างต้น คือ ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ์และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.4 และ 0.01 ตามลำดับ และใช้การผสมข้ามพันธุ์ชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุ์ในสองมิติโดยใช้จุดในการผสมข้ามพันธุ์ 1 จุด โดยใช้

โครโมโซมที่มีความยาว 400 บิต เพื่อเข้ารหัสรูปแบบขั้วเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร ที่มีขั้วโลหะ กว้าง 1 มิลลิเมตร ใช้จำนวนประชากรในการคำนวณเท่ากับ 50 และใช้รุ่นในการคำนวณเท่ากับ 2000 รุ่น โดยจะทำการคำนวณจำนวน 3 ครั้ง จากการทดลองพบว่ารูปแบบขั้วที่ทำให้เซลล์มี ประสิทธิภาพสูงสุด (ภาพประกอบ 5.14) มีประสิทธิภาพเท่ากับ 72.13 เปอร์เซ็นต์ และค่ากระแสที่ ผลิตได้จากเซลล์มีค่าเท่ากับ -7.75×10^{-2} แอมแปร์ ซึ่งเป็นรูปแบบขั้วที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการ ออกแบบด้วยเจเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้



ภาพประกอบ 5.14 รูปแบบขั้วที่ผลิตกระแสได้มากที่สุดของเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร ที่มีค่า ความกว้างขั้วเท่ากับ 1 มิลลิเมตร เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นในการผสมข้ามพันธุ และค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.4 และ 0.01 ตามลำดับ และการ ใช้ผสมข้ามพันธุชนิดที่กำหนดจำนวนจุดให้เกิดการผสมข้ามพันธุในสองมิติที่ ใช้จุดในการผสมข้ามพันธุ 1 จุด และใช้รุ่นในการคำนวณเท่ากับ 2000 รุ่น โดยมี ประสิทธิภาพและค่าการบังเงาเท่ากับ 72.13 เปอร์เซ็นต์ และ 19.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.3.4 การเปรียบเทียบการออกแบบรูปแบบขั้วรูปแบบธรรมดาทั่วไปกับรูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ

จากรูปแบบขั้วที่ดีที่สุดที่ได้จากการออกแบบด้วยเจเนติกอัลกอริทึมในภาพประกอบ 5.14 ข้างต้นของเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร หากนำมาเปรียบเทียบกับกรณีของรูปแบบธรรมดาทั่วไปที่ใช้ขั้วฟิงเกอร์และความกว้างขั้วบัสบาร์ที่มีความกว้างเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และใช้ขั้วบัสบาร์จำนวน 2 เส้น จะได้ผลการออกแบบที่เปรียบเทียบกันในทั้งสองกรณีดังตาราง 5.5 พบว่ารูปแบบขั้วธรรมดาทั่วไปจะได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพ 70.37 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 72.13 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นรูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ ที่ออกแบบได้มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้รูปแบบขั้วธรรมดาทั่วไป 1.76 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 5.5 เปรียบเทียบผลการออกแบบรูปแบบขั้วธรรมดาทั่วไปที่มีค่าความกว้างของขั้วฟิงเกอร์และความกว้างขั้วบัสบาร์เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และใช้ขั้วบัสบาร์จำนวน 2 เส้น กับรูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ ที่ขั้วขั้วโลหะที่มีความกว้าง 1 มิลลิเมตร ของเซลล์ขนาด 2x2 เซนติเมตร

ค่าคุณสมบัติสมบัติของเซลล์	รูปแบบขั้วธรรมดาทั่วไป	รูปแบบขั้วในลักษณะใดๆ
I_{out} (แอมแปร์)	-7.56×10^{-2}	-7.75×10^{-2}
P_{out} (วัตต์)	-3.40×10^{-2}	-3.49×10^{-2}
P_x (วัตต์)	-4.84×10^{-2}	-4.84×10^{-2}
P_e (วัตต์) (%)	1.82×10^{-3} (3.76)	2.18×10^{-3} (4.51)
$P_{l,e}$ (วัตต์) (%)	1.68×10^{-4} (0.35)	7.91×10^{-4} (1.63)
$P_{l,s}$ (วัตต์) (%)	9.02×10^{-4} (1.86)	7.48×10^{-4} (1.55)
P_s (วัตต์) (%)	1.14×10^{-2} (23.50)	9.43×10^{-3} (19.50)
การบ่งเงา (%)	23.50	19.50
ประสิทธิภาพของขั้ว (%)	70.37	72.13