

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	2
1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
 บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	 6
2.1 วงจรกรองอนาล็อก	6
2.1.1 วงจรกรองแบบผ่านต่ำ	6
2.1.2 วงจรกรองแบบผ่านสูง	7
2.1.3 วงจรกรองแบบผ่านแถบ	8
2.1.4 วงจรกรองแบบก้ำกั๊ตแถบ	9
2.2 เจนเนติกอัลกอริทึม	10
2.2.1 การเข้ารหัสโครโมโซม	11
2.2.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์และฟังก์ชันค่าความเหมาะสม	12
2.2.3 การครอสโอเวอร์	13
2.2.4 การมิวเตชัน	15
2.2.5 การเลือก	15
2.2.6 โครงสร้างการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึม	16

บทที่ 3 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม	18
3.1 โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย	18
3.2 การทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึม	18
3.3 การเข้ารหัสโครโมโซม	19
3.3.1 การเข้ารหัสของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อวงจร	19
3.3.2 การอ้างอิงตำแหน่งต่างๆของยีนส์ภายในโครโมโซม	20
3.3.3 การแก้ปัญหาวงจรที่ไม่สามารถประมวลผลโดยโปรแกรม PSPICE	22
3.4 ฟังก์ชันจุดประสงค์และฟังก์ชันค่าความเหมาะสม	23
3.4.1 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำ	24
ก. การหาค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	24
ข. การหาค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	25
ค. การหาค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ	26
ง. การหาค่าความผิดพลาดรวมและค่าความเหมาะสมของโครโมโซม	26
3.4.2 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูง	27
3.4.3 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบ	28
3.4.4 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบก้ำจัดแถบ	29
3.5 การครอสโอเวอร์	30
3.6 การมิวเตชัน	31
3.7 การเลือก	33
3.8 เทคนิคการปรับขนาดของอุปกรณ์ภายในวงจร	34
3.8.1 การปรับขนาดของอุปกรณ์ครั้งละ 1 ค่า	35
3.8.2 การปรับขนาดของอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่างช่วงขนาดอุปกรณ์	36
3.9 เทคนิคการเพิ่มจำนวนอันดับให้กับวงจร	38
3.10 เทคนิคการป้องกันการสูญหายของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุด	39
3.11 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	40

บทที่ 4 การทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกและผลการวิจัย	41
4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	41
4.2 ทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำ	41
4.2.1 ทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำขั้นพื้นฐาน	41
4.2.2 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	49
4.2.3 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	49
4.2.4 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	49
4.2.5 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำในช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	49
4.2.6 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำในช่วงความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์	50
4.3 การทดสอบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูง	56
4.3.1 ทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงขั้นพื้นฐาน	56
4.3.2 การทดสอบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	56
4.3.3 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	56
4.3.4 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	56
4.3.5 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงในช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	57
4.3.6 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงในช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์	57
4.4 การทดสอบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบ	64
4.4.1 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบขั้นพื้นฐาน	64
4.4.2 การทดสอบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	64

4.4.3	การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	64
4.4.4	การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	64
4.4.5	การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิร์ตซ์	65
4.4.6	การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิร์ตซ์	65
4.4.7	การทดสอบที่กำหนดระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	66
4.4.8	การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนในช่วงที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านมีค่าไม่เท่ากัน	66
4.5	การทดสอบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบ	75
4.5.1	การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบขั้นพื้นฐาน	75
4.5.2	การทดสอบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันค่าในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	75
4.5.3	การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	75
4.5.4	การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	76
4.5.5	การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบแถบกำจัดที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิร์ตซ์	76
4.5.6	การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบแถบกำจัดที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิร์ตซ์	76
4.5.7	การทดสอบที่กำหนดระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	76
4.5.8	การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนในช่วงที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านมีค่าไม่เท่ากัน	77
4.6	วิเคราะห์ผลการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาล็อก	86

บทที่ 5 บทสรุป	90
5.1 สรุปผลการวิจัย	90
5.2 ปัญหาและวิธีการแก้ไขปัญหา	91
5.3 ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารอ้างอิง	97
ประวัติผู้เขียน	99

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำ	41
4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม	42
4.3 ผลการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม	43
4.4 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราลดทอนของสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	51
4.5 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	52
4.6 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	53
4.7 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำในช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	54
4.8 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำในช่วงความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์	55
4.9 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงขั้นพื้นฐาน	58
4.10 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	59
4.11 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	60
4.12 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	61
4.13 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงในช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	62
4.14 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงในช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์	63
4.15 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบขั้นพื้นฐาน	67
4.16 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	68
4.17 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	69

4.18 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	70
4.19 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์	71
4.20 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์	72
4.21 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	73
4.22 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	74
4.23 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบขึ้นพื้นฐาน	78
4.24 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	79
4.25 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	80
4.26 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	81
4.27 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์	82
4.28 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์	83
4.29 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	84
4.30 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	85
4.31 ข้อกำหนดในการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ต่างที่มีผลต่อเวลาในการ ประมวลผลโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึม	88

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ความต้องการในการออกแบบวงจรกรองแบบผ่านต่ำ	7
2.2 ความต้องการในการออกแบบวงจรกรองแบบผ่านสูง	8
2.3 ความต้องการในการออกแบบวงจรกรองแบบผ่านแถบ	9
2.4 ความต้องการในการออกแบบวงจรกรองแบบก้ำกั้ดแถบ	10
2.5 ตัวอย่างการเข้ารหัสของโครโมโซมที่แทนด้วยเลขฐานสอง	11
2.6 ตัวอย่างการครอสโอเวอร์อย่างง่าย	13
2.7 การครอสโอเวอร์ของโครโมโซมพ่อแม่ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ	14
2.8 ตัวอย่างการมิวเตชัน	15
2.9 ตัวอย่างการเลือกโครโมโซมไปเป็นประชากรในรุ่นถัดไป	16
2.10 โครงสร้างการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึม	17
3.1 ตำแหน่งการเริ่มต้นเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวงจรแบบขั้นบันได	20
3.2 ตัวอย่างการเข้ารหัสของโครโมโซม	21
3.3 การแก้ไขปัญหาวงจรที่ไม่สามารถประมวลผลโดยโปรแกรม PSPICE	23
3.4 ตัวอย่างการครอสโอเวอร์	30
3.5 ตัวอย่างการมิวเตชัน	32
3.6 ตัวอย่างการปรับขนาดอุปกรณ์ของวงจรในตำแหน่ง (2,2)	35
3.7 ตัวอย่างการปรับขนาดอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่าง ช่วงขนาดของอุปกรณ์	36
3.8 ตัวอย่างแสดงค่าความเหมาะสม ณ จุดต่างๆของพื้นที่ว่างการค้นหาที่กว้างมาก	38
3.9 ตัวอย่างการเพิ่มอันดับต่อจากตำแหน่งหลักสุดท้ายของโครโมโซม	39
3.10 แผนผังแสดงการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัย	40
4.1 กราฟแสดงการทำงานของโปรแกรมการออกแบบวงจรกรองอนาล็อก แบบผ่านต่ำโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม	44
4.2 ลักษณะโครโมโซมของคำตอบที่เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบได้	45
4.3 ลักษณะการเชื่อมต่อของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่ได้จาก การถอดรหัสของโครโมโซมในรูปที่ 4.2	46
4.4 แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆของวงจรที่ออกแบบโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม	48

4.5 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้ อัตราลดทอนของสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	51
4.6 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	52
4.7 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	53
4.8 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	54
4.9 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์	55
4.10 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงขั้นพื้นฐาน	58
4.11 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้ การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	59
4.12 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	60
4.13 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	61
4.14 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	62
4.15 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์	63
4.16 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบขั้นพื้นฐาน	67
4.17 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	68
4.18 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	69
4.19 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	70
4.20 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิร์ตซ์	71
4.21 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิร์ตซ์	72
4.22 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	73

4.23 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	74
4.24 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบขั้นพื้นฐาน	78
4.25 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบที่กำหนดให้ การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	79
4.26 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ	80
4.27 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้	81
4.28 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิร์ตซ์	82
4.29 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิร์ตซ์	83
4.30 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบที่กำหนดให้ ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	84
4.31 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบจำกัดแถบที่กำหนดให้ อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน	85
4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองที่ได้ จากวิธีใช้เงินเนติกอัลกอริทึมและการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวิร์ดของวงจร กรองชนิดต่างๆ	86
4.33 กราฟแสดงระยะเวลาการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบโดยวิธีเงินเนติกอัลกอริทึม	87
5.1 ตัวอย่างการเกิดโครโมโซมที่มีความซ้ำซ้อนกัน	91