



การหาค่าต่ำสุดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่ม

อนุภาค

REDUCTION OF ELECTRIC FIELD FROM POWER TRANSMISSION LINES USING  
PHASE ANGLE ADJUSTMENT TECHNIQUE AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

สิริวัศม์ สีมภาพงษ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2564

การหาค่าต่ำสุดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่ม  
อนุภาค



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

REDUCTION OF ELECTRIC FIELD FROM POWER TRANSMISSION LINES USING  
PHASE ANGLE ADJUSTMENT TECHNIQUE AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION



SIRIRAT SEEMAPAPONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING  
(Electrical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2021

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การหาค่าต่ำสุดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่ม

อนุภาค

ของ

สิริรัศมี สีมภาพงษ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ..... ประธาน  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์) (ศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)

ชื่อเรื่อง	การหาค่าต่ำสุดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค
ผู้วิจัย	สิริรัศมี สีมภาพงษ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2564
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการปรับมุมเฟสแรงดันเพื่อให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด โดยพิจารณาระบบสายส่งของกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) ที่มีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระบบ 69/230kV โดยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิจารณามีทั้งหมด 3 วงจร ประกอบด้วยระบบ 69 kV จำนวน 2 วงจรและประกอบด้วยระบบ 230kV จำนวน 1 วงจร ด้วยวิธีการปรับมุมเฟสของแรงดัน ซึ่งการหาค่ามุมที่ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำที่สุด อาศัยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization :PSO) โดยการพิจารณานี้มีการนำค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของการศึกษาโดยวิธีการจัดเรียงเฟสของงานวิจัย (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) ซึ่งให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดมา 2 กรณีที่มีค่าเท่ากันแต่มีรูปแบบของการจัดเรียงเฟสที่แตกต่างกัน โดยจะให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดที่เท่ากันคือ 0.03738 kV โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาทำการลดค่าสนามไฟฟ้า ด้วยวิธีการปรับมุมเฟสร่วมกับวิธีการ PSO ซึ่งจากผลการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าจากกระบวนการของทั้ง 2 รูปแบบ ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าลดลงเหลือ 0.00236 kV/m และ 0.00435 kV/m ตามลำดับ

คำสำคัญ : ความเข้มสนามไฟฟ้า วิธีการปรับมุมเฟส วิธีการจัดเรียงเฟส วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สายส่งกำลังไฟฟ้า

Title	REDUCTION OF ELECTRIC FIELD FROM POWER TRANSMISSION LINES USING PHASE ANGLE ADJUSTMENT TECHNIQUE AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
Author	SIRIRAT SEEMAPAPONG
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2021
Thesis Advisor	Associate Professor Vuttipon Tarateeraseth , Ph.D.

This research proposes a method to minimize the electric field intensity generated by the 69/230 kV overhead power transmission lines of the Metropolitan Electricity Authority. The three overhead power transmission lines consisting two of 69 kV systems and one 230 kV system using the adjustment of the phase angle were considered. In this research, the Particle Swarm Optimization (PSO) method was used to find a phase angle to give minimum electric field intensity. According to Nunchuen and Tarateeraseth (2021), the best case for the phase arrangement forms that give a minimum electric field intensity of 0.03738 kV/m. This research selected the best cases to validate and confirm the usefulness of the proposed technique. Based on the simulated results, it showed that a generated electric field using the proposed method can be reduced to about 0.00238 and 0.00435 kV/m, respectively.

Keyword : Particle swarm optimization Phase angle adjustment Electrical fields  
Overhead power transmission lines

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้รวมถึงให้คำชี้แนะ แนวทางแก้ไข ปัญหา พร้อมคำปรึกษาด้านต่างๆทั้งในเรื่องการศึกษา การทำปริญญาานิพนธ์และอุปสรรคต่างๆ ตลอดจนการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต ซึ่งสิ่ง เหล่านี้หล่อหลอมให้ผู้วิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงในการทำปริญญาานิพนธ์ได้เป็นพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณคุณอาจารย์ บุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความรู้และให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ในการทำปริญญาานิพนธ์รวมถึงเอกสารต่างๆที่จำเป็นสำหรับมหาบัณฑิต ตลอดจนจนอำนวยความสะดวกในต่างๆ ให้กับผู้จัดทำขอพระคุณเป็นอย่างสูง ตลอดจนการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต และขอขอบคุณบัณฑิตที่คอยให้คำแนะนำถึงข้อสงสัยต่างๆในการส่งเอกสารทุกครั้ง สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษา

ข้าพเจ้าหวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่ได้อ่านและผู้ที่นำไปศึกษาต่อไม่มากนักน้อย สิ่งที่สร้างประโยชน์จากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้เป็นชื่อเสียงและเกียรติยศของผู้ที่มีส่วน เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมดโดยไม่มีข้อกังขาใดๆทั้งสิ้น

สิริรัศมี สีมภาพงษ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ .....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
สนามไฟฟ้า .....	6
ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า.....	11
ศักย์ไฟฟ้า .....	13
วิธีของภาพ (method of image).....	19
ระบบไฟฟ้ากำลัง (electrical power systems).....	23
ผลกระทบหรืออันตรายจากสนามไฟฟ้า.....	27
วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization).....	28
วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization).....	30



บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	36
ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	36
แผนผังการทำงานโดยรวมของงานวิจัย.....	37
วิธีการดำเนินงานในการหาคำตอบ .....	39
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน .....	47
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน.....	56
สรุปผลการดำเนินงาน.....	56
ปัญหาและอุปสรรค.....	57
ข้อเสนอแนะ .....	57
บรรณานุกรม .....	58
ประวัติผู้เขียน.....	61

## สารบัญตาราง

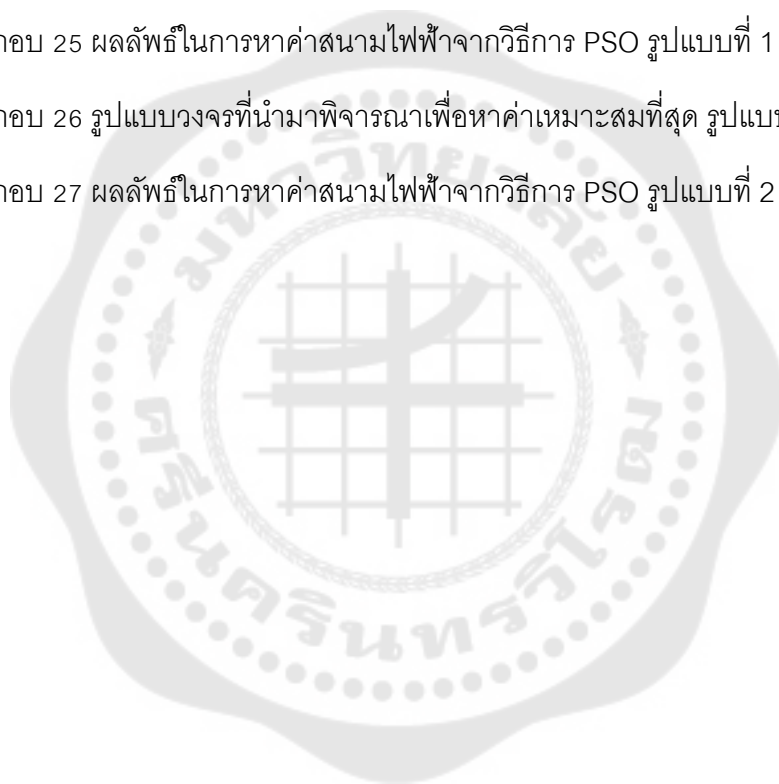
	หน้า
ตาราง 1 ค่ามาตรฐานของค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละสถานที่.....	28
ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ PSO .....	52
ตาราง 3 ผลลัพธ์จากการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ค่าจากการหาค่าโดยวิธีการ PSO ระบบที่ 1 ที่แรงดัน 230 kV.....	53
ตาราง 4 ผลลัพธ์จากการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ค่าจากการหาค่าโดยวิธีการ PSO ระบบที่ 2 ที่แรงดัน 69 kV.....	53
ตาราง 5 ผลลัพธ์จากการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ค่าจากการหาค่าโดยวิธีการ PSO ระบบที่ 3 ที่แรงดัน 69 kV.....	53
ตาราง 6 ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีการ PSO ร่วมกับการพิจารณามุมเฟสของแรงดัน.....	56

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 สนามไฟฟ้าจากประจุ $+Q$ และ $-Q$ .....	7
ภาพประกอบ 2 หลักการกรรณที่ระยะห่างของคู่อิมบ์เปลี่ยนเป็นหลักการสนาม ของฟาราเดย์ ...	7
ภาพประกอบ 3 สนามไฟฟ้าเนื่องจากหน่วยเล็กๆ .....	9
ภาพประกอบ 4 ลักษณะการกระจายฟลักซ์ไฟฟ้า .....	11
ภาพประกอบ 5 ลักษณะการกระจายฟลักซ์ไฟฟ้า(ต่อ) .....	12
ภาพประกอบ 6 การเคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้า $Q$ ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า $E$ จากจุด $B$ ไปยังจุด $A$ .....	14
ภาพประกอบ 7 จุดประจุไฟฟ้า .....	17
ภาพประกอบ 8 วิธีของภาพ 1 .....	20
ภาพประกอบ 9 วิธีของภาพ 2 .....	22
ภาพประกอบ 10 รูปแบบระบบไฟฟ้ากำลัง .....	24
ภาพประกอบ 11 ลักษณะโครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้ารูปแบบต่างๆของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย .....	27
ภาพประกอบ 12 แผนผังอัลกอริทึมของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) .....	32
ภาพประกอบ 13 แผนผังการทำงาน .....	37
ภาพประกอบ 14 แผนผังการทำงาน (ต่อ) .....	38
ภาพประกอบ 15 แผนภาพกระบวนการหาคำตอบของงานวิจัย .....	39
ภาพประกอบ 16 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB .....	40
ภาพประกอบ 17 แผนภาพจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้า .....	41
ภาพประกอบ 18 แผนภาพของสายส่งสำหรับการคำนวณสนามไฟฟ้า .....	41

ภาพประกอบ 19 รูปแบบที่ 1 ในการนำมาพิจารณากับวิธีการ PSO.....	44
ภาพประกอบ 20 รูปแบบที่ 2 ในการนำมาพิจารณากับวิธีการ PSO.....	45
ภาพประกอบ 21 แผนผังกระบวนการ PSO .....	46
ภาพประกอบ 22 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้า .....	48
ภาพประกอบ 23 รูปแบบที่นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด สนามไฟฟ้า.....	49
ภาพประกอบ 24 รูปแบบวงจรที่นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด รูปแบบที่ 1 .....	51
ภาพประกอบ 25 ผลลัพธ์ในการหาค่าสนามไฟฟ้าจากวิธีการ PSO รูปแบบที่ 1 .....	51
ภาพประกอบ 26 รูปแบบวงจรที่นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด รูปแบบที่ 2 .....	54
ภาพประกอบ 27 ผลลัพธ์ในการหาค่าสนามไฟฟ้าจากวิธีการ PSO รูปแบบที่ 2.....	54



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันนี้ระบบกำลังไฟฟ้ามีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีการส่งจ่ายกำลังสูงไปถึง 500 kV (Yang, Wu, Gu, & Bi, 2009) เมื่อค่าแรงดันของระบบส่งจ่ายมีค่าสูงมากขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น (วุฒิมิพล, 2562) ซึ่งในปัจจุบันสายส่งกำลังไฟฟ้ามีการกระจายตัวอยู่ทั้งในชุมชนและท้องถนน ทำให้เห็นได้ว่ามีสนามไฟฟ้าที่สามารถสัมผัสกับร่างกายมนุษย์อย่างมากมาย (Das, Gogoi, & Chatterjee, 2015; Min, Yu-xin, Longcheng, Xin-zhen, & Qing-quan, 2011) ในปัจจุบันนี้งานวิจัยมากมายพบว่าสนามไฟฟ้านั้นมีผลต่อร่างกายมนุษย์ (Das et al., 2015) โดยปกติระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะใช้ความถี่ 50 Hz หากมีมนุษย์อยู่ตำแหน่งใต้สายส่ง สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะผ่านร่างกายไป และสนามไฟฟ้าบางส่วนจะถูกดูดกลืนผ่านเข้าสู่ร่างกายอาจทำให้เกิดเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ได้ให้ข้อมูลว่าสนามไฟฟ้าอาจก่อให้เกิดผลร้ายกับสุขภาพของมนุษย์ (Association, 1984) โดยส่งผลให้เกิดโรคต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น มะเร็ง (Das et al., 2015) เนื่องจากสัมผัสกับสนามแม่ไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน ต่อมาจึงมีการกำหนดค่ามาตรฐานสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อมนุษย์ตามข้อกำหนดของ ICNIRP

เนื่องจากเหตุผลดังกล่าว ทำให้มีการศึกษาเพื่อลดค่าของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าของสนามไฟฟ้าหลายชนิด เช่น การพิจารณาส่วนประกอบของเสาส่งกำลังไฟฟ้า (Qingyu et al., 2014) ค่าของระยะของเสา (Krol & Machczynski, 2018) การจัดเรียงเฟสของสายส่งไฟฟ้า (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) และการปรับมุมเฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Rankovic, Mijailovic, Rozgic, & Cetenovic, 2017) เป็นต้น โดยงานวิจัย (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) ได้มีการนำเสนอการปรับเรียงลำดับเฟสของสายส่ง เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของการไฟฟ้านครหลวง ประเทศไทยโดยพิจารณาที่ระบบ 69 kV จำนวน 2 วงจร และ 230 kV จำนวน 1 วงจร ซึ่งในงานวิจัยให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำสุดเท่ากับ 0.03738 kV/m ซึ่งถือเป็นค่าที่ดีที่สุดของการทำงานวิจัยนั้น

โดยในงานวิจัยนี้จะพัฒนางานวิจัยของ (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำลงยิ่งขึ้นจาก 2 รูปแบบ โดยการเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับค่าสนามไฟฟ้าให้ต่ำลงคือ มุมเฟส เนื่องจากการทำการศึกษาค้นคว้าแล้วมุมเฟสเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สามารถปรับและจะส่งผลกระทบต่อค่าสนามไฟฟ้ามาพิจารณา โดย 2 รูปแบบที่นำมาพิจารณานั้นเกิดจากการ

จัดเรียงสายส่งแรงดันที่เกิดขึ้นและให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ดีที่สุดของงานวิจัย (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) โดยงานงานวิจัยนี้ได้นำมาปรับปรุงให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามการค้นหาคำตอบของการหาค่ามุมเฟสที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำที่สุด จะต้องอาศัยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เนื่องจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีหลากหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นวิธีการ Genetic Algorithm และ Particle Swarm optimization (PSO) (Rankovic et al., 2017) ซึ่งทางงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้วิธีการ PSO เนื่องจากวิธีการนี้เป็นที่นิยมในทางวิศวกรรม และวิธีการนี้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (Kennedy & Eberhart, 1995; Mikki & Kishk, 2006; Poli, Kennedy, & Blackwell, 2007; Shi, 2001) รวมถึงยังใช้เวลาในการหาคำตอบของการออกแบบได้อย่างรวดเร็ว (Krol & Machczynski, 2018; Rankovic et al., 2017) อีกด้วย

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่มีปริมาณต่ำที่สุดเหมาะสมที่สุดที่วัดจากเสาส่งถึงพื้นดินที่ระยะ 1 m ที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะ
2. เพื่อศึกษาและทดลองด้วยวิธีการค้นหาคำตอบแบบ PSO เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด ร่วมกับการพิจารณามุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งกำลังไฟฟ้า
3. เพื่อเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการดั้งเดิมก่อนมีการปรับมุมเฟสของแรงดันกับค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวิธีการ PSO ร่วมกับการพิจารณาการปรับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งกำลังไฟฟ้า

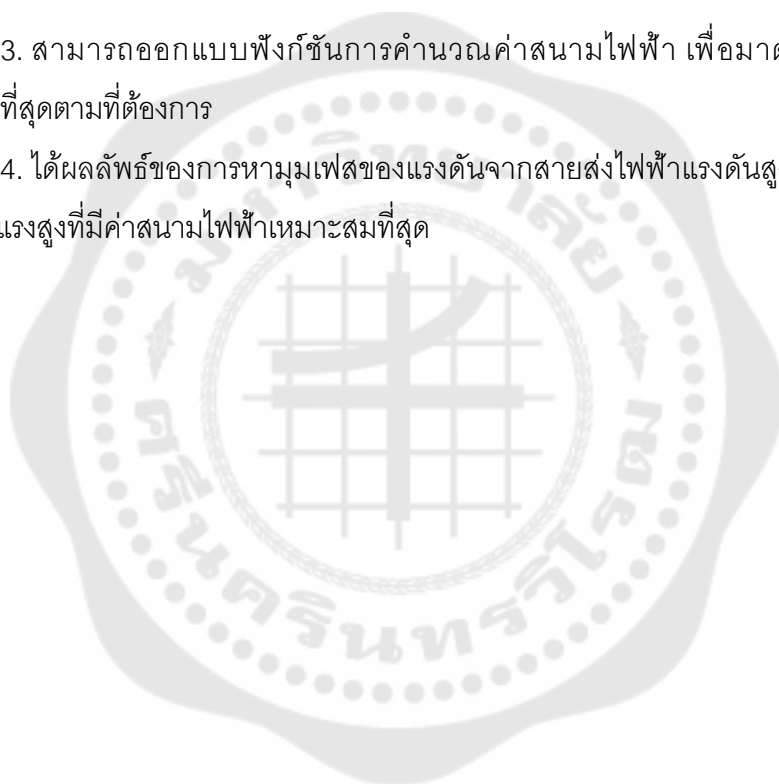
### ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์และออกแบบการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำสุด ด้วยวิธีการ PSO โดยวิเคราะห์ร่วมกับการพิจารณารูปแบบการหามุมเฟสของแรงดันที่เหมาะสมที่สุดจากเสาไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีวงจร 3 เฟสจำนวน 3 วงจร ซึ่งประกอบด้วย
  - 1.1 วงจร 3 เฟส ที่ระดับแรงดัน 230 kV จำนวน 1 วงจร
  - 1.2 วงจร 3 เฟส ที่ระดับแรงดัน 69 kV จำนวน 2 วงจร
2. เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณตามสูตรของการคำนวณกับค่าสนามไฟฟ้าจากการคำนวณโดยวิธีการ PSO เพื่อตรวจสอบความใกล้เคียงของวิธีที่ใช้ในการศึกษานี้

3. เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าสนามไฟฟ้าที่นำมาปรับปรุงกับค่าสนามไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาก่อนได้รับการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยการพิจารณามุมเฟส ร่วมกับวิธี PSO

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการดำเนินงานของวิธีการ PSO ของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในการหาคำตอบ
2. สามารถใช้วิธีการ PSO ในการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดได้จากการพิจารณาค่ามุมเฟส
3. สามารถออกแบบฟังก์ชันการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า เพื่อมาดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามที่ต้องการ
4. ได้ผลลัพธ์ของการหามุมเฟสของแรงดันจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงของทั้ง 3 วงจรบนเสาไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่าสนามไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด







## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าที่พบอยู่ตามบ้านเรือน ท้องถนน หรือเขตชุมชน ซึ่งในส่วนของกาไฟฟ้าในนครหลวงประเทศไทยติดตั้งสายส่งไฟฟ้าโดยคำนึงถึงสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยคำนึงถึงความปลอดภัยตาม World Health Organization(WHO) แล้ว โดยมีงานวิจัยที่หลากหลาย เร่งเห็นถึงผลกระทบและมุ่งเน้นไปที่ความเป็นไปได้ต่อสุขภาพจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ต่ำที่เกิดขึ้น จากที่มีการสังเกตพบว่าสนามไฟฟ้าจากพื้นที่ธรรมชาติทั่วโลกมีค่าตั้งแต่ต่ำกว่า 200 V/m และอาจจะมีค่าที่สูงถึง 50 kV/m (ในช่วงที่เกิดฟ้าผ่า) จึงทำให้เห็นได้ว่าเมื่อมีคนยืนอยู่ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะทำให้มีค่าสนามไฟฟ้าที่สามารถผ่านร่างกายสูง และส่งผลให้มีผลกระทบต่อร่างกาย โดยเกิดจากมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าอยู่บนพื้นผิวของร่างกายทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายสู่พื้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของหัวใจและหลอดเลือดให้มีการไม่ปกติ รวมถึงอาการข้างเคียงอื่นๆ เมื่อมีการรับค่าสนามไฟฟ้าสะสม หรือรับในปริมาณที่มาก จากการศึกษาทางการแพทย์พบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย สามารถเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาวและโรคทางระบบประสาท ฯลฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัยเด็กมีผลกระทบมากกว่าบุคคลทั่วไป (Association, 1984) และ (Das et al., 2015) แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าค่าสนามไฟฟ้ามีผลต่อร่างกายมากน้อยเพียงใด จึงเป็นที่มาของงานวิจัยจำนวนมากที่มีการเสนอวิธีการต่างๆ เพื่อลดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น รวมถึงค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าที่มิสามารถสัมผัสและได้รับในชีวิตประจำวัน (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021)

Suthasinee Nunchuen, และ Vuttipon Tarateeraseth ได้ศึกษาการหาค่าสนามไฟฟ้าจากการคำนวณสนามไฟฟ้าที่สร้างโดยสายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะคำนวณโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การจำลองนั้นใช้ 69 kV และ 230 kV ซึ่งสนามไฟฟ้าได้รับการประเมินโดยใช้ที่ผลการจำลองโดย MATLAB โดยการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการวัดผลลัพธ์ที่กราฟแสดงผลลัพธ์ โดยตัวแปรที่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อลดค่าสนามไฟฟ้าคือการทำการจัดเรียงเฟสของสายส่งไฟฟ้า ซึ่งทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำถึง 0.0378 kV/m โดยมีทั้งหมด 3 รูปแบบ ซึ่งงานวิจัย (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) เลือกใช้วิธีการลองผิดลองถูกซึ่งจะใช้เวลาในการคำนวณหาค่าค่อนข้างใช้ระยะเวลาจากงานวิจัย (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) จะเห็นว่า

สนามไฟฟ้าถูกปรับปรุงโดยทำการจัดเรียงเฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งให้ค่าที่ดี แต่จากการศึกษาค้นคว้านั้นยังมีอีกหนึ่งตัวแปรที่จะสามารถช่วยลดค่าสนามไฟฟ้าได้ด้วย โดยงานวิจัย (Rankovic et al., 2017) กล่าวว่าถ้ามีการพิจารณาการปรับค่ามุมเฟสในการลดสนามไฟฟ้าและได้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำลง จึงทำให้คิดว่าถ้ามีการนำการปรับมุมเฟสของแรงดันมาใช้ในการลดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการจัดเรียงเฟสที่ดีแล้ว การปรับมุมเฟสก็จะสามารถให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำลงได้ จึงทำให้เห็นได้ว่าในกรณีของการทดลองนี้ จึงใช้มุมเฟสในการลดค่าสนามไฟฟ้านั้น

แต่ในปัจจุบันมีเครื่องมือและกระบวนการที่นำมาใช้ในการหาค่าของคำตอบเพื่อการหาค่าเหมาะสมที่สุด หลากหลายวิธีการที่จะถูกนิยมนำมาใช้ เช่น Genetic Algorithm และ Particle Swarm optimization (PSO) เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้มีการนำเอาวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวิธีการ PSO มาใช้เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ของคำตอบที่ต้องการหาในการลดค่าสนามไฟฟ้า โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนี้ถูกคิดค้นเพื่อมาใช้ในการคำนวณหาค่าตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยผู้คิดค้นและพัฒนาคือ Kennedy และ Eberhart ในปี ค.ศ. 1995 (Kennedy & Eberhart, 1995) โดยทั้งสองท่านได้เขียนบทความนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดจับกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) ทำให้วิธีการนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ของคำตอบ รวมถึงเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมและถูกแพร่หลายไปอย่างรวดเร็วเป็นที่นิยมใช้กว่าสิบประเทศ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งวิธีการ PSO นี้มีงานวิจัยที่นำมาใช้ในด้านวิศวกรรมและวิทยาการคอมพิวเตอร์เป็นส่วนใหญ่ โดยงานวิจัยจะมีการมุ่งเน้นเพื่อจะพัฒนางานวิจัยต่างๆ และต่อมีการพัฒนาและตรวจสอบการใช้งานของ PSO โดยพิจารณาที่ปัจจัยที่ส่งผลต่อวิธีการที่สามารถหาค่าเหมาะสมที่สุด ให้ดียิ่งขึ้น โดยปัจจัยสำคัญของวิธีการนั้น คือค่าของน้ำหนักและความเฉื่อยหรือความเร็วของวิธีการ รวมถึงปัจจัยอื่นที่ส่งผลทั้งทางตรงและอ้อมอีกด้วย โดยการพิจารณานั้นจะช่วยเพิ่มการตรวจสอบแนวโน้มของคำตอบ รวมถึงการวิเคราะห์ผลให้มีค่าของคำตอบที่ดียิ่งขึ้น (Shi, 2001) และยังคงส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ของการหาค่าเหมาะสมที่สุด ที่มากขึ้นด้วย

นอกจากนี้แล้ววิธีการค้นหาค่าตอบแบบ PSO ได้ถูกนักวิจัยนำมาใช้กันทั่วโลก เพื่อให้ได้คำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยวัตถุประสงค์ของการนำมาใช้เพื่อหาค่าตอบนั้นด้วยวิธีการนี้นั้นเป็นการแสดงให้เห็นถึงกระบวนการและการหาค่าตอบแบบภาพรวมของงาน โดยมีทิศทางและคำตอบที่แสดงให้เห็นถึงทิศทางและการใช้งานของวิธีการที่น่าสนใจ ทำให้ความสำคัญของกระบวนการนี้นั้นสามารถที่จะครอบคลุมทุกด้านของพื้นที่นี้ภายใต้ข้อจำกัดของการหาค่าตอบได้จากข้อจำกัด (Poli et al., 2007) จึงทำให้มีการนำวิธีการ PSO เข้ามาถูกนำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ด้านอุตสาหกรรม เคมี และไฟฟ้า ซึ่งในด้านไฟฟ้านั้นก็จะถูก

นำไปช่วยในการหาคำตอบไม่ว่าจะเป็นด้านกำลัง แรงดัน หรือแม้กระทั่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และในแต่ละกระบวนการก็จะพิจารณาตัวแปรที่ต้องการปรับปรุง เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ของคำตอบที่ต้องการศึกษาที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุด

จึงทำให้เห็นได้ว่าการลดค่าสนามไฟฟ้านั้นสามารถใช้มูมเฟสในการปรับปรุงและหาค่าเหมาะสมที่สุดร่วมกับวิธีการ PSO ในการค้นหาคำตอบ จะทำให้เห็นได้การพิจารณาตัวแปร คือ มูมเฟส และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แบบ วิธีการ PSO จะสามารถส่งผลให้คำตอบมีค่าที่ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการจำลองงานวิจัยนี้จะส่งผลต่อการหาคำตอบไม่ว่าจะเป็นเวลาในการหาตำแหน่งคำตอบ หรือความถูกต้องในหาคำตอบ (Rankovic et al., 2017) จากที่กล่าวข้างต้นทั้งหมดนี้ที่มาของงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งโดยใช้วิธีการ PSO ร่วมกับการปรับมูมเฟส โดยการนำค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการจัดเรียงเฟสมาปรับปรุงเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ของคำตอบให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากการศึกษาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าวิธีการ PSO นั้นสามารถนำมาใช้ได้จริงและประสบผลสำเร็จอย่างน่าพอใจในการนำมาใช้เพื่อหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุด

## สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยเส้นแรงไฟฟ้าของประจุบวกจะพุ่งออกและประจุลบจะพุ่งเข้าหา แสดงดังภาพประกอบ 1 ในที่ที่มีเส้นแรงไฟฟ้า ซึ่งทิศทางของเส้นแรงไฟฟ้า คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จุดนั้นๆ โดยสามารถแผ่สนามไฟฟ้าไปได้

จากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's Law) ชาール คูลอมบ์ (Charles Coulomb, 1736-1806) ศึกษาขนาดของแรงระหว่างประจุไฟฟ้าพบว่าแรงที่เกิดขึ้นระหว่างประจุจะมีทิศตามแนวเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างประจุนั้น ถ้าประจุเป็นชนิดเดียวกันจะเป็นแรงผลักและประจุต่างชนิดเป็นแรงดูด ขนาดของแรงลดลงตามระยะห่างกำลังสอง โดยที่แรงผลักจะขึ้นกับปริมาณประจุ จะได้ว่า

$$\vec{F} = \frac{k_e Q_1 Q_2}{r^2} \vec{a}_r \quad [\text{N}]$$

โดยจะมีค่า

$r$  คือ ระยะห่างระหว่างประจุ มีหน่วยเป็นม (เมตร)

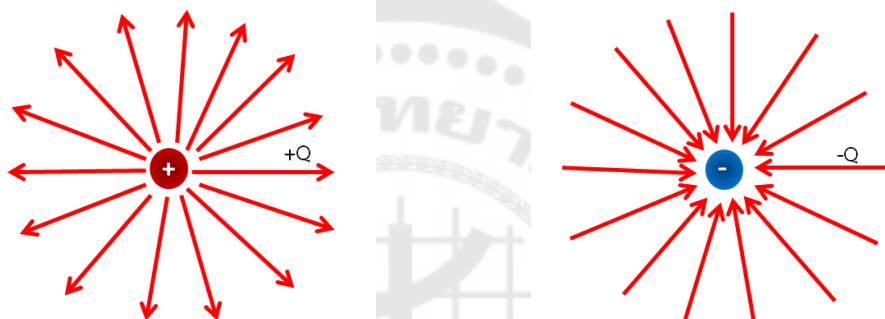
$Q_1$  และ  $Q_2$  คือ ประจุ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

$k_e$  คือ ค่าคงตัวคูลอมบ์ (มีค่าเท่ากับ  $8.9875 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}$ )

หรืออาจจะเขียนความสัมพันธ์กับตัวกลางระหว่างประจุได้

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2)$$

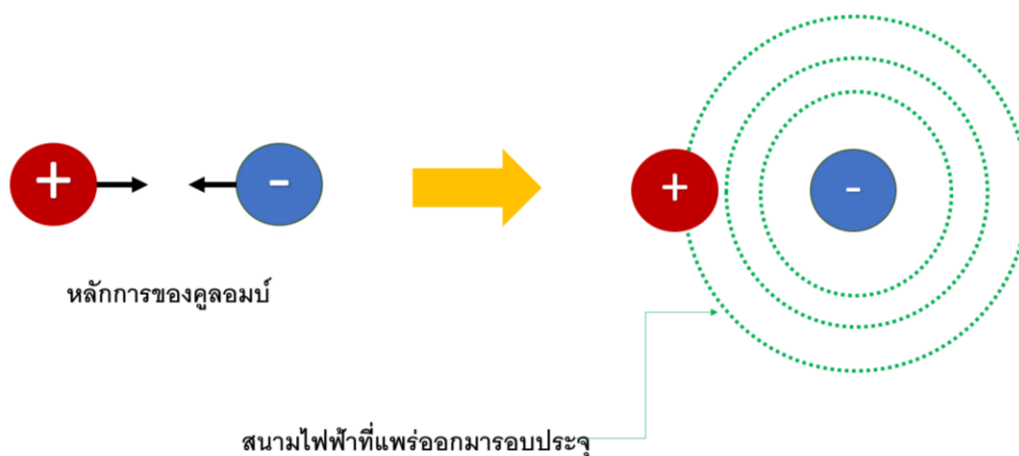
เมื่อค่า  $\epsilon_0$  คือค่าสภาพยอมของตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ (มีค่าเท่ากับ  $8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{m}^2/\text{N}$ )



(ก) สนามไฟฟ้ามีทิศออกจากประจุ  $+Q$       (ข) สนามไฟฟ้ามีทิศเข้าหาประจุ  $-Q$

ภาพประกอบ 1 สนามไฟฟ้าจากประจุ  $+Q$  และ  $-Q$

หลักการ สนาม ของ ฟาราเดย์



หลักการของคูลอมบ์

สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมารอบประจุ

ภาพประกอบ 2 หลักการกิริยาที่ระยะห่างของคูลอมบ์เปลี่ยนเป็นหลักการสนามของฟาราเดย์

สนามไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคประจุได้โดยไม่ต้องสัมผัสกัน (แรงเนื่องจากสนามของแรงทางไฟฟ้า) โดยกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) เสนอแนวคิดของสนามไฟฟ้าว่า สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นรอบวัตถุที่มีประจุ ดังนั้นประจุใด ๆ จะสร้างอิทธิพลเป็นสนามไฟฟ้าขึ้นมา เรียกว่าประจุก้นกำเนิด (source charge) จากการทดสอบว่าบริเวณนั้นมีสนามไฟฟ้าทำได้โดยการนำประจุ  $q_0$  เข้าไปในระบบดังกล่าวประกอบ 2 เพื่อใช้เป็นประจุกทดสอบ (test charge) ถ้าบริเวณนั้นมีสนามไฟฟ้าจะมีแรงกระทำกับประจุกทดสอบที่เกิดจากสนามของประจุก้นกำเนิด โดยนิยามของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ที่มีอิทธิพลของประจุก้นกำเนิดนั้นว่า คือแรงที่กระทำกับประจุกทดสอบ ( $\vec{F}$ ) ต่อขนาดของประจุกทดสอบ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad [\text{N/C}] \quad (3)$$

ขนาดของสนามไฟฟ้าหาได้จากการวางประจุกสมมติเป็นประจุกทดสอบ แรงที่กระทำกับประจุกทดสอบจะเท่ากับ

$$F = \frac{k_e Q q_0}{r^2} \vec{a}_r \quad [\text{N}] \quad (4)$$

ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิทธิพลของประจุ  $Q$  เท่ากับ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{k_e Q}{r^2} \vec{a}_r \quad [\text{N/C}] \quad (5)$$

ขนาดของสนามไฟฟ้า  $\vec{E} = \frac{k_e |Q|}{r^2} \vec{a}_r$  โดยทั่วไปจะกำหนดให้ประจุกทดสอบเป็นประจุกบวก ดังนั้น ทิศทางของสนามไฟฟ้าเนื่องจากอิทธิพลของประจุกบวกมีทิศพุ่งออกจากประจุและประจุกลบมีทิศพุ่งเข้าหาประจุ ในทางกลับกันเมื่อรู้ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดใดใดสามารถหาแรงที่กระทำกับประจุได้จาก  $\vec{F} = q_0 \vec{E}$  ซึ่งแรงนี้จะทำให้อนุภาค  $q_0$  เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

$$\vec{F} = q_0 \vec{E} = m \vec{a} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

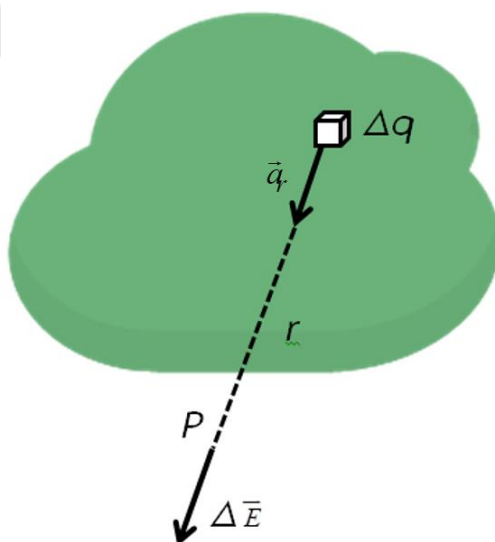
ถ้าอนุภาค  $q_0$  เป็นประจุบวก แรงที่เกิดขึ้นจะมีทิศเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้า แต่ถ้า  $q_0$  เป็นประจุลบแรงจะมีทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าจากประจุที่กระจายตัวอย่างต่อเนื่องบนวัตถุ โดยจะมีการกระจายตัวเป็นรูปทรงนั้น ซึ่งถือว่าการกระจายตัวนั้นประกอบด้วยอนุภาคของจุดประจุจำนวนมาก และสนามไฟฟ้าเนื่องจากวัตถุหาได้โดยพิจารณาอิทธิพลของสนามที่เกิดจากแต่ละอนุภาคที่รวมเป็นวัตถุนั้น จะทำให้ได้ว่าสนามไฟฟ้ารวมเท่ากับผลรวมของแต่ละจุดเล็กๆ บนวัตถุทั้งสิ้น หลักการง่ายในการพิจารณาคือ สมมติว่าวัตถุนั้นประกอบขึ้นจากหน่วยที่เล็กมากๆ จำนวนมากให้มีค่าเป็น  $i$  หน่วย ซึ่งแต่ละหน่วยมีประจุ เมื่อรวมประจุจากทุกหน่วยเข้าด้วยกันจะต้องได้ขนาดประจุเท่ากับประจรวมจะให้มีค่าเป็น  $Q$  ดังนั้นสนามไฟฟ้าจากหนึ่งหน่วยเล็กๆ จะเท่ากับ

$$\Delta \vec{E} = \frac{k_e \Delta q}{r^2} \vec{a}_r \quad [\text{N/C}] \quad (7)$$

โดยที่เป็นเวกเตอร์หน่วย  $\vec{a}_r$  (unit vector) บอกทิศทางของสนามเนื่องจากหน่วยเล็กๆ ถ้ารวมผลของสนามไฟฟ้าจากหน่วยเล็กๆ จนครบทุกหน่วยจะได้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากวัตถุทั้งสิ้นได้

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i = k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \vec{a}_r \quad [\text{N/C}] \quad (8)$$



ภาพประกอบ 3 สนามไฟฟ้าเนื่องจากหน่วยเล็กๆ

โดยที่ดัชนี  $i$  แทนหน่วยเล็กๆ เริ่มจากหน่วยที่ 1 ไปเรื่อยๆ จนถึงหน่วยสุดท้ายที่ระยะ  $i$  จากนั้น  $r$  คือระยะห่างจากหน่วยนั้นๆ ไปยังจุดที่พิจารณาค่าสนามไฟฟ้า ( $E$ ) สังเกตได้ว่าระยะ  $r_i$  จากแต่ละหน่วยย่อยจะไม่เท่ากัน เพราะวัตถุประกอบด้วยหน่วยย่อยจำนวนมาก ซึ่งการหาผลรวม  $\sum_i \vec{E}$  โดยการบวกไปเรื่อยๆ จะต้องใช้เวลาอย่างมากในการหาค่า จึงหาผลรวมโดยการอินทิเกรต (integration) จะสะดวกกว่าถ้าให้  $\Delta q$  มีค่าน้อยมากๆ เข้าใกล้ศูนย์ ทำให้หน่วยเล็กๆ นี้จะมีขนาดเป็น  $dq$  ทำให้มีค่าของสนามไฟฟ้า  $dE$  มีค่าเท่ากับ

$$d\vec{E} = k_e \frac{dq}{r^2} \vec{a}_r \quad [\text{N/C}] \quad (9)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมเนื่องจากวัตถุต่อเนื่องใดๆ เกิดจากการรวมอิทธิพลจากส่วนเล็กๆ ซึ่ง  $d\vec{E}$  จะมีทิศทางของสนามไฟฟ้ารวมเกิดจากการรวมแบบเวกเตอร์ของแต่ละหน่วยเล็กๆ โดย  $d\vec{E}$  ซึ่งอาจจะมีทิศทางที่แตกต่างกันไป จะทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าดังนี้

$$\vec{E} = \int d\vec{E} \quad [\text{N/C}] \quad (10)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าตัวแปรของการอินทิเกรตคือค่าของ  $dq$  ที่ระยะห่าง  $r$  จากหน่วยย่อยไปยังจุดที่จะหาค่าสนามไฟฟ้า ซึ่งหน่วยของประจุและระยะทางเป็นหน่วยที่แตกต่างกัน โดยการอินทิเกรตนี้จะง่ายขึ้นถ้าปรับหน่วยของตัวแปรทั้งสองให้สอดคล้องกันและขึ้นกับลักษณะรูปทรงของวัตถุ จะทำให้การหาสนามไฟฟ้าจากประจุที่กระจายตัวต่อเนื่องจะง่ายขึ้น ถ้าหาขนาดของประจุที่จุดเล็กๆ นั้นจากความหนาแน่นของประจุ (charge density) ที่พิจารณา

ถ้าประจุสุทธิ  $Q$  กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัตถุ ทุุกๆจุดบนวัตถุจะมีความหนาแน่นของประจุเท่ากัน วัตถุอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามมิติของรูปทรงของวัตถุวัตถุที่มีเพียง 1 มิติมีเฉพาะความยาว ( $l$ ) จะหาความหนาแน่นเป็นแบบเชิงเส้น ( $\rho_l$ ) วัตถุที่มี 2 มิติมีความยาวและความกว้างเป็นพื้นที่ ( $A$ ) จะหาความหนาแน่นเป็นแบบเชิงพื้นผิว ( $\rho_s$ ) วัตถุที่มี 3 มิติจะมีปริมาตร ( $V$ ) จะหาความหนาแน่นเป็นเชิงปริมาตร ( $\rho_v$ )

$$\rho_l = \frac{Q}{l} \quad [\text{C/m}] \quad \rho_s = \frac{Q}{A} \quad [\text{C/m}^2] \quad \rho_v = \frac{Q}{V} \quad [\text{C/m}^3] \quad (11)$$

## ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า

ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density:  $\vec{D}$ ) สามารถนิยามได้ในความหมายที่มีทิศทางเดียวกันกับเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้า โดยอยู่ในอากาศว่างหรือสุญญากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$|\vec{D}| = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \psi_E}{\Delta s} \right) \quad (12)$$

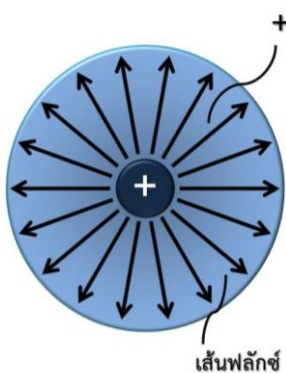
ซึ่ง  $\Delta s$  เป็นพื้นที่ที่ตัดผ่านของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า โดย  $\Delta \psi_E$  จะเกิดจากจำนวนเส้นฟลักซ์ที่ตัดผ่านและตั้งฉากกับ  $\Delta s$  ดังแสดงในภาพประกอบ 4(ก) ซึ่งสามารถระบุเป็นสมการที่มาจากค่าเท่ากับ

$$\Delta \psi_E = D_{\text{normal}} \Delta s = (D \cos \theta) \Delta s = \vec{D} \cdot \vec{\Delta s} \quad (13)$$

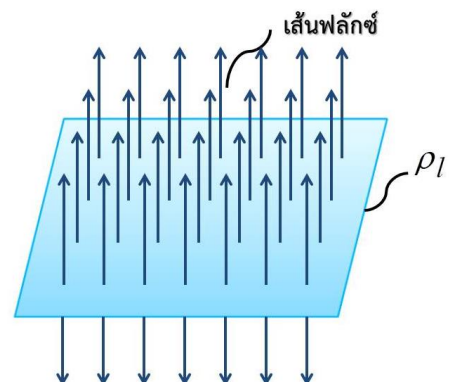
หรือ

$$d\psi_E = \vec{D} \cdot d\vec{s} \quad (14)$$

โดยที่  $d\vec{s}$  คือเวกเตอร์ของพื้นที่ผิวเชิงอนุพันธ์



(ก)

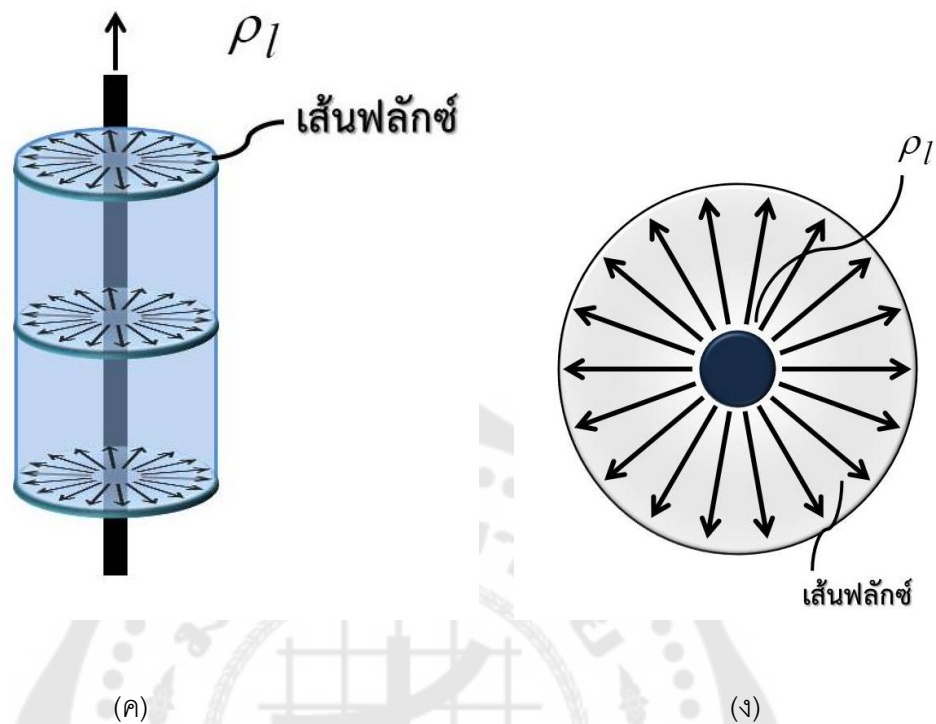


(ข)

ภาพประกอบ 4 ลักษณะการกระจายฟลักซ์ไฟฟ้า

ของ (ก) จุดประจุ (ข) แผ่นประจุเชิงผิว





ภาพประกอบ 5 ลักษณะการกระจายฟลักซ์ไฟฟ้า(ต่อ)

ของ (ค) ประจุเชิงเส้น (ง) ภาพมุมมองจากด้านบน

พิจารณาจากสมมติฐานจำนวนเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าที่พุ่งออกจากประจุไฟฟ้าจะเท่ากับขนาดของประจุไฟฟ้า ( $\Delta\psi_E = Q$ ) เมื่อความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าที่ตัดผ่านพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีรัศมี  $r$  ในกรณีที่กรณีประจุไฟฟ้า  $Q$  วางอยู่ที่จุดกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบ 6(ข) จะแสดงให้เห็นว่าจำนวนเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าที่ตัดผ่านพื้นที่  $\Delta s$  ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่  $\Delta s$  หาด้วย  $\Delta s$  โดยในกรณีนี้พื้นที่  $\Delta s$  จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวทรงกลม ดังแสดงในสมการ ( $\Delta\psi_E = Q$ ) ซึ่งเป็นไปตามนิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถระบุได้ว่า

$$\vec{D} = \frac{\psi_E}{4\pi r^2} \vec{a}_r = \frac{Q}{4\pi r^2} \vec{a}_r \quad (15)$$

ในการทำงานเดียวกัน หากทำการเปรียบเทียบกับสมการความเข้มสนามไฟฟ้าของจุดประจุ

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{a}_r \quad (16)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (15) และสมการที่ (16) ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าในอากาศว่างหรือในสุญญากาศจะมีค่าเท่ากับ

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad [\text{C}/\text{m}^2] \quad (17)$$

โดยสมการที่ (17) จะเป็นจริงเฉพาะในอากาศว่างหรือในสุญญากาศเท่านั้น จากนั้นทำให้เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (15) ยังครอบคลุมถึงการคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าในการกระจายของประจุจากลักษณะต่างๆอีกด้วย ไม่ว่าจะเป็น ประจุเชิงปริมาตร ประจุเชิงผิว หรือประจุเชิงเส้น ซึ่งเขียนจะสามารถระบุเป็นสมการได้เท่ากับ

$$\vec{D} = \int \frac{dQ}{4\pi R^2} \vec{a}_R \quad [\text{C}/\text{m}^2] \quad (18)$$

โดยที่  $dQ = \rho_l dl = \rho_s ds = \rho_v dv$  ขึ้นอยู่กับลักษณะของประจุ

### ศักย์ไฟฟ้า

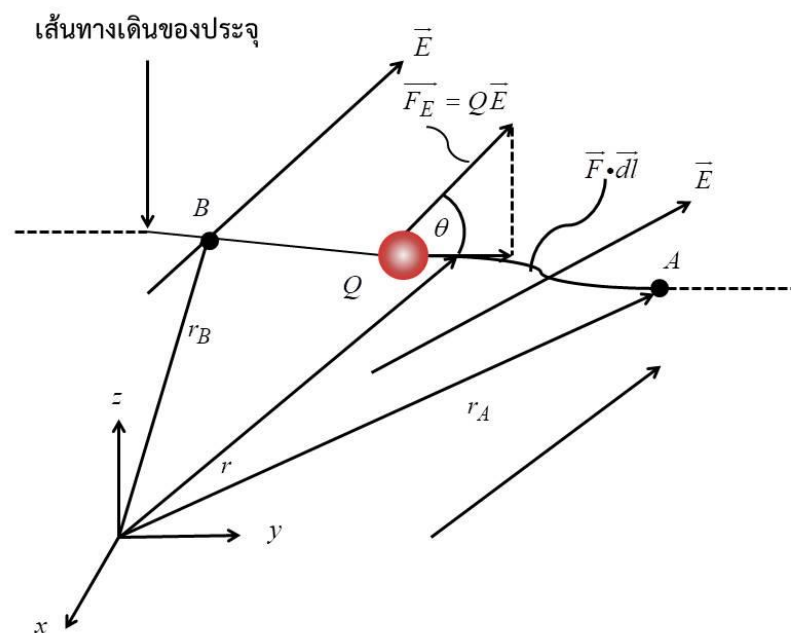
หลักการของสนามของแรงที่เกิดจากประจุที่อยู่ในลักษณะต่างๆ ได้ถูกพัฒนามาจากหลักการของสนามไฟฟ้า โดยความเข้มสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  นิยามว่าเป็นแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบต่อหน่วยทดสอบนั้น ดังนั้นแรงที่กระทำต่อประจุ  $Q$  ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า จากนั้นเมื่อเกิดแรงโดยธรรมชาติจะทำให้ประจุ  $Q$  เกิดจากการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของ  $\vec{E}$  แต่อีกทางหนึ่งหากต้องการเคลื่อนย้ายประจุ  $Q$  ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  จากจุด  $B$  ไปยังจุด  $A$  ดังแสดงในภาพประกอบ 5 จะทำให้ได้งานที่ใช้ (work done) ในการเคลื่อนย้ายจุดประจุในสนามไฟฟ้าไปเป็นระยะ  $d\vec{l}$  จะมีค่าเท่ากับ

$$dW = |\vec{F}_E| \cos \theta dl = -\vec{F}_E \times d\vec{l} = Q\vec{E} \times d\vec{l} \quad [\text{J}] \quad (19)$$

โดยเครื่องหมายลบที่เกิดขึ้นในสมการที่ (19) จะสามารถอธิบายได้ว่างานที่ต้องใช้ในการออกแรงกระทำทำให้ประจุ  $Q$  ที่เคลื่อนย้ายต้านกับทิศทางสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ซึ่งหาก  $dW > 0$  นั่นคืองานที่ต้องใช้ในการออกแรงต้าน แรงจากสนามไฟฟ้าเพื่อเคลื่อนย้ายประจุ และหาก  $dW < 0$  นั่นคืองานที่ได้จากสนามไฟฟ้าในการเคลื่อนย้ายประจุ ดังนั้น งานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุในสนามไฟฟ้าจากจุด  $B$  ไปยังจุด  $A$  จะมีค่าเท่ากับ

$$W = -Q \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad [\text{J}] \quad (20)$$

จากสมการที่ (20) หากนำเอา  $W$  หาค่าด้วย  $Q$  จะได้



ภาพประกอบ 6 การเคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้า  $Q$  ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า  $\vec{E}$   
จากจุด  $B$  ไปยังจุด  $A$

โดย  $V_{AB}$  คือความต่างศักย์ไฟฟ้า (potential difference) ระหว่าง  $A$  และ  $B$  โดยนิยามให้มีค่าเท่ากับงานที่ต้องใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุ  $+1\text{C}$  จากจุด  $B$  ไปยังจุด  $A$  นั่นเอง และ

$d\vec{l}$  จะหมายถึงเวกเตอร์ระยะทางเชิงอนุพันธ์ ( $d\vec{l}$ ) ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระบบพิกัด เช่น ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ระบบพิกัดทรงกลม

$$d\vec{l} = dx\vec{a}_x + rdy\vec{a}_y + dz\vec{a}_z \quad (\text{ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน}) \quad (21)$$

$$d\vec{l} = dx\vec{a}_r + rd\phi\vec{a}_\phi + dz\vec{a}_z \quad (\text{ระบบพิกัดทรงกระบอก}) \quad (22)$$

$$d\vec{l} = dr\vec{a}_r + rd\theta\vec{a}_\theta + r\sin\theta d\phi\vec{a}_\phi \quad (\text{ระบบพิกัดทรงกลม}) \quad (23)$$

หากพิจารณาภาพประกอบ 3 กำหนดให้สนาม  $\vec{E}$  เกิดจากจุดประจุไฟฟ้า  $Q$  วางอยู่ที่ตำแหน่งของจุดกำเนิด จะได้

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{a}_r \quad [\text{V/m}] \quad (24)$$

ซึ่งกรณีจุดประจุ ระบบพิกัดที่เหมาะสมในการเลือกใช้โดยหลักการสมมาตร ได้แก่ ระบบพิกัดทรงกลม ดังนั้น จากสมการที่ (21) (24) และ (25)

$$V_{AB} = -\int_A^B \left( \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{a}_r \right) \times (dr\vec{a}_r + rd\theta\vec{a}_\theta + r\sin\theta d\phi\vec{a}_\phi) \quad [\text{V}] \quad (25)$$

$$V_{AB} = -\int_A^B \left( \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right) dr\vec{a}_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right\} = V_A - V_B \quad [\text{V}] \quad (26)$$

ถ้าต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้า (หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า) ของจุดใด ในอากาศว่าง ก็จะต้องให้จุดเริ่มต้นอยู่ที่  $\infty$  หรือใช้จุดที่  $\infty$  เป็นจุดอ้างอิงและที่ตำแหน่ง  $\infty$  เป็นจุดอ้างอิง และที่ตำแหน่ง  $\infty$  ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ สามารถอธิบายโดยการยกตัวอย่างได้เช่น หากต้องการหาเฉพาะศักย์ไฟฟ้า  $V_A$  ต้องกำหนดให้  $r_B \rightarrow \infty$  ซึ่งจะทำให้  $V_B = 0$

$$V_A = \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_A} \quad [\text{V}] \quad (27)$$

ดังนั้น สำหรับกรณีจุดประจุไฟฟ้า หากต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆบนอากาศว่าง จะหาได้จาก

$$V = \int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad [\text{V}] \quad (28)$$

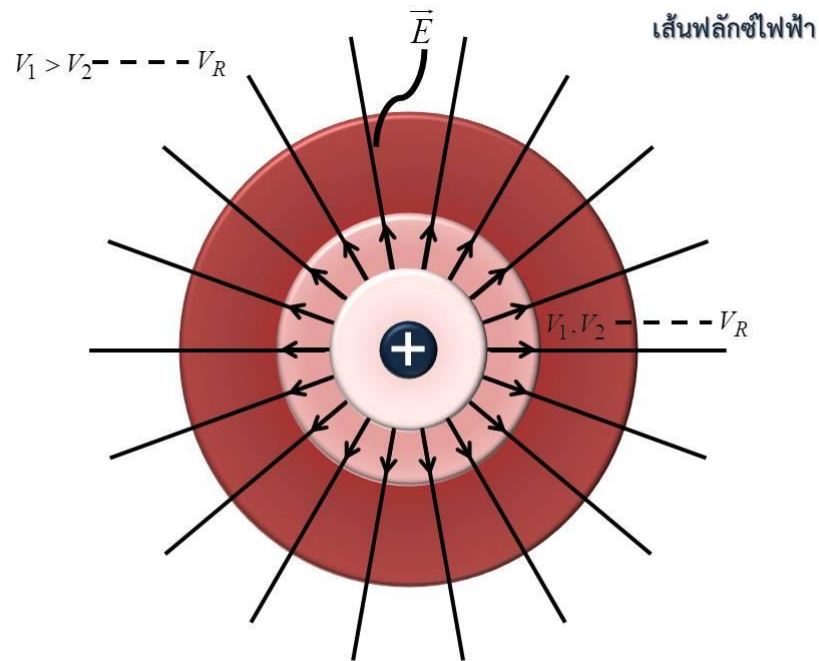
อย่างไรก็ตามหากเลือกจุดอ้างอิงต่างออกไป โดยที่ไม่ใช่ที่  $\infty$  และจุดอ้างอิงดังกล่าวมีค่าไม่เท่ากับศูนย์จะแสดงได้ว่า

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} + C \quad [\text{V}] \quad (29)$$

โดยที่  $C$  คือค่าคงที่ หรือศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งอ้างอิงที่เลือกนั้นและหากพิจารณา จะเห็นได้ว่าจุดประจุไฟฟ้า  $Q$  จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าล้อมรอบจุดประจุ  $Q$  ดังกล่าวที่อยู่ตรงกลางในลักษณะทรงกลม โดยที่ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันที่ทุกๆตำแหน่งบนผิวทรงกลมรัศมี  $r$  และผิวทรงกลมดังกล่าวจะเรียกว่า ผิวสมศักย์ (equipotential surface) และที่ผิวสมศักย์นี้จะไม่เกิดความต่างศักย์แต่อย่างใด

สำหรับกรณีที่จุดประจุไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิดแต่ตั้งอยู่ที่จุดใดๆในอวกาศว่างที่มีเวกเตอร์พิกัดเท่ากับ  $\vec{r}'$  ศักย์ไฟฟ้า  $V(x, y, z)$  หรือ  $V(\vec{r})$  ที่ตำแหน่งเวกเตอร์พิกัด  $\vec{r}$  จะมีค่าเท่ากับ

$$V(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \left| \vec{r} - \vec{r}' \right|} + C \quad [\text{V}] \quad (30)$$



### ภาพประกอบ 7 จุดประจุไฟฟ้า

โดยอาศัยหลักการซ้อนทับ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $r$  อันเกิดจากจุดประจุจำนวน  $n$  ตัว  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  วางอยู่ที่ตำแหน่ง  $r_1, r_2, \dots, r_n$  ตามลำดับ จะมีค่าเท่ากับ

$$V(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_1|} + \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_2|} + \dots + \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_n|}$$

$$= \sum_{k=1}^n \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_k|} \quad [\text{V}] \quad (31)$$

ในการทำงานเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $\vec{r}$  ใดๆ ในอวกาศว่างที่เกิดจากการกระจายของประจุในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ประจุเชิงเส้น ประจุเชิงผิว และประจุเชิงปริมาตร สามารถหาค่าที่ต้องการหาได้เช่นกัน โดยแทนที่จุดประจุ  $dQ$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $dQ = \rho_l dl = \rho_s ds = \rho_v dV$  และวางอยู่ที่เวกเตอร์ตำแหน่ง  $\vec{r}'$  จะได้

$$V(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_l \frac{\rho_l \vec{r}' dl'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad [\text{V}] \quad (\text{ประจุเชิงเส้น}) \quad (32)$$

$$V(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_s \frac{\rho_s \vec{r}' dS'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad [\text{V}] \quad (\text{ประจุเชิงผิว}) \quad (33)$$

$$V(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho_v \vec{r}' dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad [\text{V}] (\text{ประจุเชิงปริมาตร}) \quad (34)$$

นอกจากนั้น หากทำการเคลื่อนย้ายจุดประจุในสนามไฟฟ้าจากจุด  $B$  ไปยังจุด  $A$  ให้เป็นเส้นทาง  $C_1$  และย้อนกลับจากจุด  $A$  ไปยังจุด  $B$  ให้เป็นเส้นทาง  $C_2$  จะได้การเคลื่อนที่ในลักษณะวงปิด (closed contour) โดยการเคลื่อนที่ในลักษณะดังที่กล่าวมานั้นจะไม่สามารถทำให้เกิดงานขึ้นได้ ซึ่งการเคลื่อนย้ายประจุในเงื่อนไขดังกล่าวจะไม่ขึ้นอยู่กับเส้นทางที่ใช้ในการเคลื่อนที่แต่อย่างใด และสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

$$V_{BA} = V_B - V_A = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad [\text{V}] \quad (35)$$

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad [\text{V}] \quad (36)$$

$$V_{BA} + V_{AB} = V_B - V_A + V_A - V_B = 0 \quad [\text{V}] \quad (37)$$

ซึ่งจะได้

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad [\text{V}] \quad (38)$$

โดยสนามไฟฟ้าสถิตจะมีคุณสมบัติเป็นสนามอนุรักษ์ (conservative field) ซึ่งทำให้หลักการคงค่าพลังงาน (principle of conservation of energy) เป็นจริง กล่าวคือ ถ้าวัตถุอนุภาคเคลื่อนที่กลับสู่จุดตั้งต้นโดยมีพลังงานเหลือติดมาด้วยแล้ว มันก็จะสามารถเคลื่อนที่เป็นวงรอบได้

อีกติดต่อกันไปเรื่อย ๆ ไม่มีสิ้นสุด โดยที่ในแต่ละรอบจะมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีกบ้างเล็กน้อยและไม่ทำให้มีการสูญเสียพลังงานจากส่วนอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบแต่อย่างใด เป็นถ้าปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจริง จะทำให้เกิดคลาดเคลื่อนที่ชั่วนิรันดร์ (perpetual motion)

ซึ่งขัดกับหลักการคงค่าพลังงานทำให้ค่ามันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ นอกจากนั้น ก็คือสมการรูปแบบทั่วไปของกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law) อย่างไรก็ตาม สำหรับเรื่องความต่างศักย์ไฟฟ้า มีข้อสังเกตดังต่อไปนี้

1. สำหรับ  $V_{AB}$  จุดเริ่มต้นจะอยู่ที่  $B$  และสิ้นสุดจะอยู่ที่จุด  $A$
2. ในกรณี  $V_{AB} < 0$  หรือมีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นงานที่ได้จากสนามไฟฟ้าในการเคลื่อนย้ายประจุและถ้า  $V_{AB} > 0$  หรือมีค่าบวกจะหมายถึงงานที่ต้องใช้ในการออกแรงต้านแรงจากสนามไฟฟ้าเพื่อเคลื่อนย้ายประจุ

กรณีสนามไฟฟ้าสถิต คือ  $\vec{E}$  จะสามารถหา  $V_{AB}$  หรืองาน  $W_{AB}$  นั้นจะไม่ขึ้นกับการเคลื่อนย้ายประจุ  $Q$  ของเส้นทางที่เลือกใช้ เนื่องจากผลรวมของเวกเตอร์  $d\vec{l} \cdot (\int d\vec{l})$  มีเวกเตอร์ที่มีจุดเริ่มต้นและพุ่งไปหาจุดสุดท้ายเพียงจุดเดียวเท่านั้น โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าเส้นทางของ  $d\vec{l}$  จะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม ผลรวมของเวกเตอร์  $d\vec{l}$  ก็ยังคงเป็นเวกเตอร์เดียวกันอยู่นั่นเอง

### วิธีของภาพ (method of image)

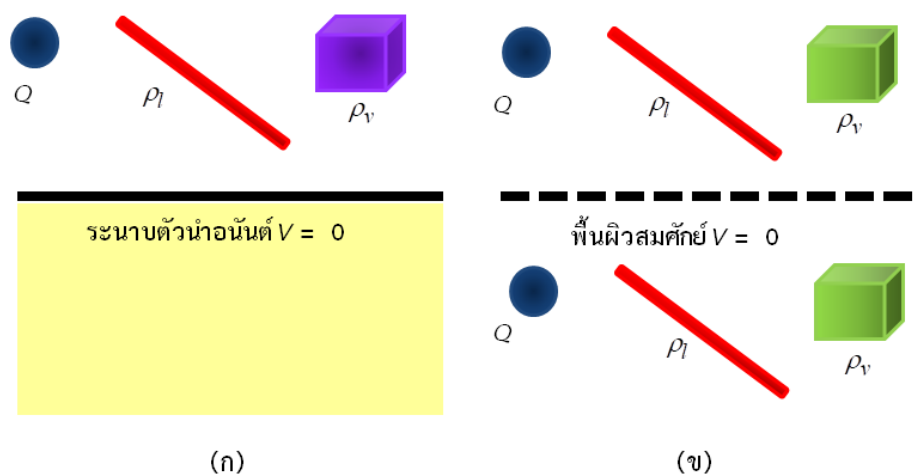
วิธีของภาพที่ถูกพิจารณาเพื่อนำมาใช้ในการหาค่าศักย์ไฟฟ้า ความเข้มสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า และการกระจายตัวของประจุเชิงผิว ที่เกิดจากประจุไฟฟ้าโดยมีตัวนำไฟฟ้าร่วมอยู่ด้วย โดยวิธีของภาพจะสามารถช่วยในการหลีกเลี่ยงการแก้ปัญหา จากการนำมาประยุกต์ใช้โดยอาศัยการพิจารณาสมการลาปลาซและสมการปัวซอง จากที่กล่าวมานี้จะอาศัยความจริงที่ว่า สนามไฟฟ้าสถิตที่มีตัวนำอยู่ภายใต้มันจะมีคุณสมบัติเป็นผิวสมศักย์ และถึงแม้ว่าวิธีของภาพจะไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาสถิตได้ทุกกรณี โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เฉพาะกรณีปัญหาสถิตที่มีตัวนำไฟฟ้าปรากฏอยู่ด้วยเท่านั้น ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้ การแก้ปัญหาสถิตโดยอาศัยวิธีของภาพจะสามารถกระทำได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก โดยตามทฤษฎีวิธีของภาพได้กล่าวว่า “การแก้ปัญหาสถิตที่ซึ่งประจุไฟฟ้าวางอยู่เหนือระนาบตัวนำนั้นที่ต่อลงกราวด์ (ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำต่อลงกราวด์จะมีค่าเท่ากับศูนย์) ระนาบอนันต์ที่ต่อลงกราวด์นั้นสามารถแทนด้วยพื้นผิวสมศักย์ (equipotential surface) และภายในเหนือระนาบตัวนำอนันต์ที่ต่อลงกราวด์นั้นก็ปรากฏภาพฉายของประจุดังกล่าวด้วย” เพื่อให้เข้าใจทฤษฎีวิธีของภาพมากขึ้น พิจารณาภาพประกอบ 9 (ก) โดยมีจุดประจุ เส้นประจุ และประจุ



เชิงปริมาตรวางอยู่เหนือระนาบตัวนำอนันต์ หากต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้า ความเข้มสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า และการกระจายของประจุเชิงผิว โดยอาศัยวิธีของภาพจิตต์ปัญหาดังกล่าวจะกลายเป็นภาพประกอบ 9(ข) ซึ่งประกอบด้วย จุดประจุ เส้นประจุ และประจุเชิงปริมาตร วางอยู่เหนือพื้นผิวสมมาตร (ซึ่งถูกนำมาแทนที่ระนาบตัวนำอนันต์) และพื้นผิวสมมาตรนั้นจะปรากฏภาพฉายของประจุไฟฟ้าดังกล่าว ในการประยุกต์ใช้วิธีของภาพจะต้องมีความสอดคล้องกับเงื่อนไข 2 เงื่อนไข ดังนี้

1. ภาพฉายของประจุไฟฟ้าจะต้องวางอยู่ภายในเนื้อระนาบตัวนำอนันต์
2. ภาพฉายของประจุไฟฟ้าจะต้องวางอยู่ภายในเนื้อระนาบตัวนำอนันต์ที่ซึ่งศักย์ไฟฟ้าบน พื้นผิวของตัวนำดังกล่าวมีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าคงที่

โดยเงื่อนไขในข้อที่ 1 จะเป็นเงื่อนไขที่สำคัญมากเพื่อให้มีความสอดคล้องกับสมการปัวซอง และข้อที่ 2 เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต



ภาพประกอบ 8 วิธีของภาพ 1

(ก) ประจุไฟฟ้าวางอยู่เหนือระนาบตัวนำอนันต์

(ข) ประจุไฟฟ้าวางอยู่เหนือพื้นผิวสมมาตร ซึ่งระนาบตัวนำอนันต์จะถูกแทนที่ด้วยภาพฉายของประจุไฟฟ้าดังกล่าวที่อยู่ใต้ผิวสมมาตรนั้น

จากนั้นจุดประจุไฟฟ้าวางอยู่เหนือตัวนำระนาบกราวด์ (point charge above a grounded conducting plane) พิจารณาจุดประจุ  $+Q$  ที่วางอยู่เหนือตัวนำระนาบกราวด์อนันต์ (infinite perfect grounded conducting plane) ที่วางตัวอยู่ในระนาบ  $xy$  ด้วยระยะ  $h$  ตาม

แนวแกน  $z$  ดังแสดงในภาพประกอบ 4(ก) โดยวิธีของภาพประกอบ 8(ก) จะกลายเป็นภาพประกอบ 8(ข) โดยอาศัยภาพประกอบ 8(ข) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่จุด  $P(x, y, z)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = \frac{Q\vec{r}_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^3} + \frac{Q\vec{r}_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^3} \quad (39)$$

โดย  $\vec{r}_1 = (x, y, z) - (0, 0, h) = (x, y, z - h)$  (40)

$$\vec{r}_2 = (x, y, z) - (0, 0, h) = (x, y, z + h) \quad (41)$$

ดังนั้น สมการที่ (42) จะกลายเป็น

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{xa_x + ya_y + (z-h)a_z}{(x^2 + y^2 + (z-h)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{xa_x + ya_y + (z+h)a_z}{(x^2 + y^2 + (z+h)^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (42)$$

อย่างไรก็ตาม ที่  $z=0$  ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีเฉพาะส่วนประกอบในแนวแกน  $z$  เท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต

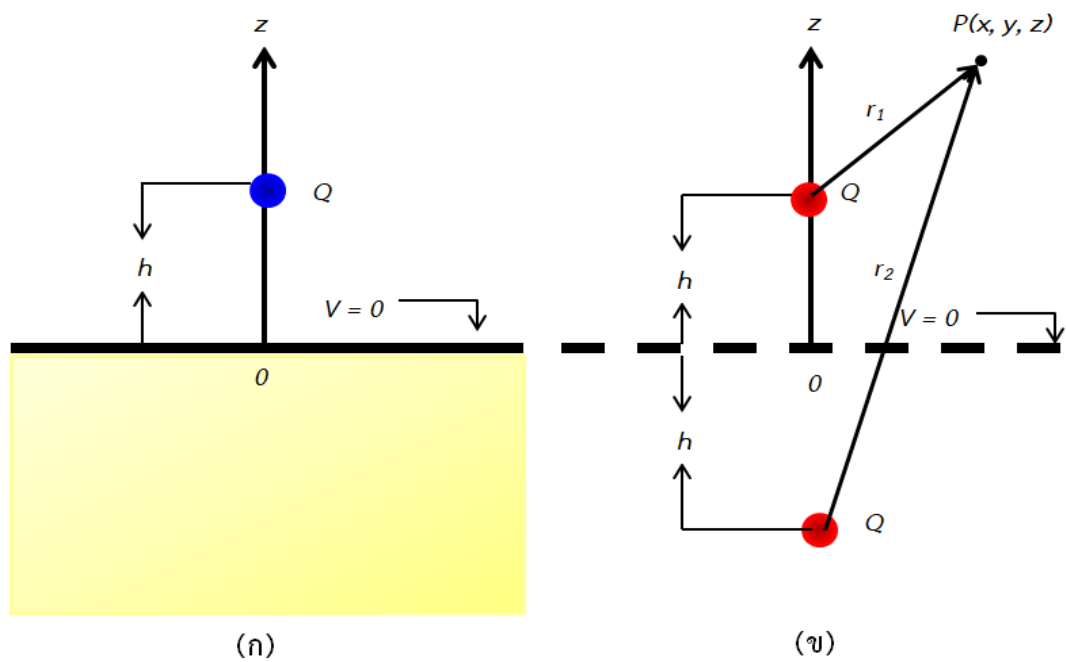
ศักย์ไฟฟ้าที่จุด  $P(x, y, z)$  สามารถหาได้จาก  $V = -\int_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$  จะได้

$$\vec{V} = \vec{V}_+ + \vec{V}_- = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{(-Q)}{4\pi\epsilon_0 r_2} \quad (43)$$

$$\vec{V} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}} \right] \quad (z > 0) \quad (44)$$

$$V = 0 \quad (z \leq 0) \quad (45)$$

สำหรับประจุเชิงผิว (ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำ) สามารถหาได้โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้าซึ่งได้



(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 9 วิธีของภาพ 2

(ก) จุดประจุวางอยู่เหนือระนาบตัวนำอนันต์ (ข) จุดประจุวางอยู่เหนือพื้นผิวสมคัณฑ์ และภาพฉายของประจุไฟฟ้า

$$\rho_s = D_n = \epsilon_0 E_n|_{z=0} = \frac{-Q}{2\pi(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (46)$$

จากสมการที่ (46) ประจุ (ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ) มีค่าเท่ากับ

$$Q_i = \int_s \rho_s ds = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-Qh}{2\pi(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} dx dy \quad (47)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการอินทิเกรต ทำการเปลี่ยนตัวแปรจากระบบพิกัดคาร์ทีเซียนเป็นระบบพิกัดทรงกระบอก โดยจาก  $r = x^2 + y^2$  และ  $dx dy = r dr d\phi$  จะได้

$$Q_i = \int_s \rho_s ds = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\infty} \frac{-Qh}{2\pi(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} r dr d\phi \quad (48)$$

$$= \frac{-Qh}{\sqrt{r^2 + h^2}} \Big|_{r=0}^{r=\infty} = -Q \quad (49)$$

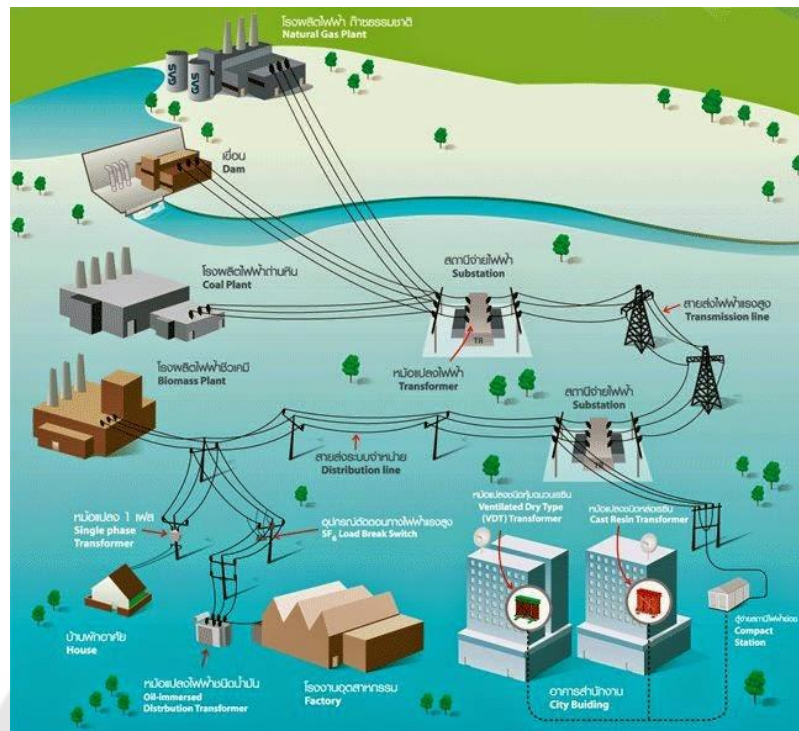
ซึ่งเป็นไปตามคาดการณ์เพราะสนามไฟฟ้าสิ้นสุดที่ตัวนำระนาบอนันต์แผ่นนี้

### ระบบไฟฟ้ากำลัง (electrical power systems)

ระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึง โครงสร้างของโครงข่ายที่รวบรวมอุปกรณ์ และระบบต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อทำการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ไม่ใช่ไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่ต้องการ และส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าด้วยระดับส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงไปยังระบบผู้ใช้งานในรูปโครงข่ายปิดขนาดใหญ่ดังภาพประกอบ 9 โดยระบบไฟฟ้ากำลังที่ตึ้นนั้นจะต้องคำนึงถึง ความปลอดภัย ความมั่นคงของทั้งระบบ ให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพอีกทั้งยังเป็นที่น่าเชื่อถือ และมีราคาประหยัดเหมาะสมตามหลักเศรษฐศาสตร์และผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม โดยต้องเป็นระบบที่เป็นที่ได้รับการยอมรับ

โดยโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ระบบย่อย ซึ่งไม่ไม่ว่าจะเป็นระบบเล็กหรือระบบใหญ่ของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วย

1. ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า
2. ระบบส่งกำลังไฟฟ้า
3. ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า



ภาพประกอบ 10 รูปแบบระบบไฟฟ้ากำลัง

ที่มา [http://lopeka-ee-room.blogspot.com/2014/12/blog-post\\_12.html](http://lopeka-ee-room.blogspot.com/2014/12/blog-post_12.html)

### 1.) ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า

ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่รู้จักกันโดยทั่วไปของระบบผลิตกำลังไฟฟ้านั้น จะเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่อย่างมากมายหลายรูปแบบและหลายลักษณะ เช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงจักรไอน้ำ โรงจักรแบบกังหันแก๊ส ตลอดจนโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยการที่จะพิจารณาการใช้งานของโรงไฟฟ้าที่ผลิตนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นทางด้านกายภาพ สิ่งแวดล้อม อาทิ เช่น สภาพแวดล้อมของพื้นที่ ทรัพยากรไม่ว่าจะเป็นมนุษย์หรือสัตว์ และที่ขาดไม่ได้คือราคา เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วจะมีระดับแรงดันตั้งแต่ระดับ 11 kV ถึง 27 kV ของประเทศไทย ซึ่งผู้ผลิตจะต้องทำการยกระดับแรงดันผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อทำการผลิตไฟฟ้าให้กับระบบโดยการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

- ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า จะสามารถผลิตได้จากตัวต้นกำลังหรือเครื่องกังหันไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เกิดการหมุน โดยแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจะเป็นแรงดัน โดยส่วนใหญ่ไม่เกิน 20 kV เพราะหากมีการผลิตไฟฟ้ามากกว่า 20 kV อาจส่งผลกระทบต่ออายุของการทำงานของโรงไฟฟ้านั้นได้
- ส่วนลานไกไฟฟ้า เป็นส่วนที่สำคัญ โดยส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลงแรงดันที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าที่สูงขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังสถานีไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกล รวมถึงยังช่วยในการลดความสูญเสียในระบบจากการทำให้ค่าแรงดันสูงขึ้น ซึ่งส่วนนี้จะประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นหลัก จากที่ทราบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะช่วยในการทำหน้าที่แปลงแรงดันให้มีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถที่จะช่วยระบบป้องกันทางไฟฟ้าอีกด้วย
- ส่วนป้องกันการเดินเครื่องและการควบคุมไฟฟ้า ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการป้องกันจะส่งผลให้ไม่เป็นอันตรายหรือเกิดการสูญเสียได้โดยจะป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และรีเลย์ ตรวจจับความผิดปกติทางไฟฟ้า

โดยการผลิตจะถูกกำหนดเป็น “กิโลวัตต์” หรือ “เมกะวัตต์” ส่วนความสามารถในการผลิตหรือกำลังการผลิตที่ควบคุมไปกับระยะเวลาในการผลิต เรียกว่า “พลังงานไฟฟ้าที่ได้” ถ้ามองในแง่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตนำมาใช้ควบคุมกับระยะเวลาในการใช้ เรียกว่า “พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป” “วัตต์-ชั่วโมง” หรือ “กิโลวัตต์-ชั่วโมง”

## 2.) ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นระบบที่รับพลังงานไฟฟ้ามาจากระบบผลิตและได้รับการยกระดับแรงดันต่อจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยนั้นจะมีระดับแรงดันตั้งแต่ระดับ 69 kVจนถึงระดับ 500 kV ซึ่งสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าไปเป็นระยะทางที่ไกลได้โดยรักรับแรงดันนั้นไว้ได้เนื่องจากระยะทางจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจะอยู่ห่างไกลจากโหลดมาก ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบ่งออกได้ดังนี้

1. ระบบไฟฟ้าเหนือศีรษะ (overhead line system) เป็นระบบที่ซึ่งสายตัวนำบนเสาส่งผ่านที่โยงแฉ่งจากสถานีไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกสถานีไฟฟ้าหนึ่ง ง่ายต่อการบำรุงรักษาและตรวจสอบข้อขัดข้องของระบบ

2. ระบบไฟฟ้าใต้ดิน (underground cable system) สายตัวนำจะถูกฝังลงไป  
ในดินตามรางเดินสาย และมีบ่อพักเป็นช่วงๆ เหมาะสำหรับติดตั้งในที่ชุมชน  
หรือพื้นที่แออัด มีความต้องการพลังงานไฟฟ้า (โหลด) สูง แต่การบำรุงรักษา  
ทำได้ไม่สะดวกและมีราคาค่อนข้างสูงตามไปด้วย

โดยระบบส่งกำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งระดับการทำงานได้ถึง 3 ระดับ คือ

1. ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage: HV) มีระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 230 kV
2. ไฟฟ้าแรงสูงเอ็กซ์ตรา (extra high voltage: EHV) มีระดับแรงดันไฟฟ้า  
ตั้งแต่ 230 kV-1,000 kV
3. ไฟฟ้าแรงสูงอัลตรา (ultra-high voltage: UHV) มีระดับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่  
1,000 kV ขึ้นไป

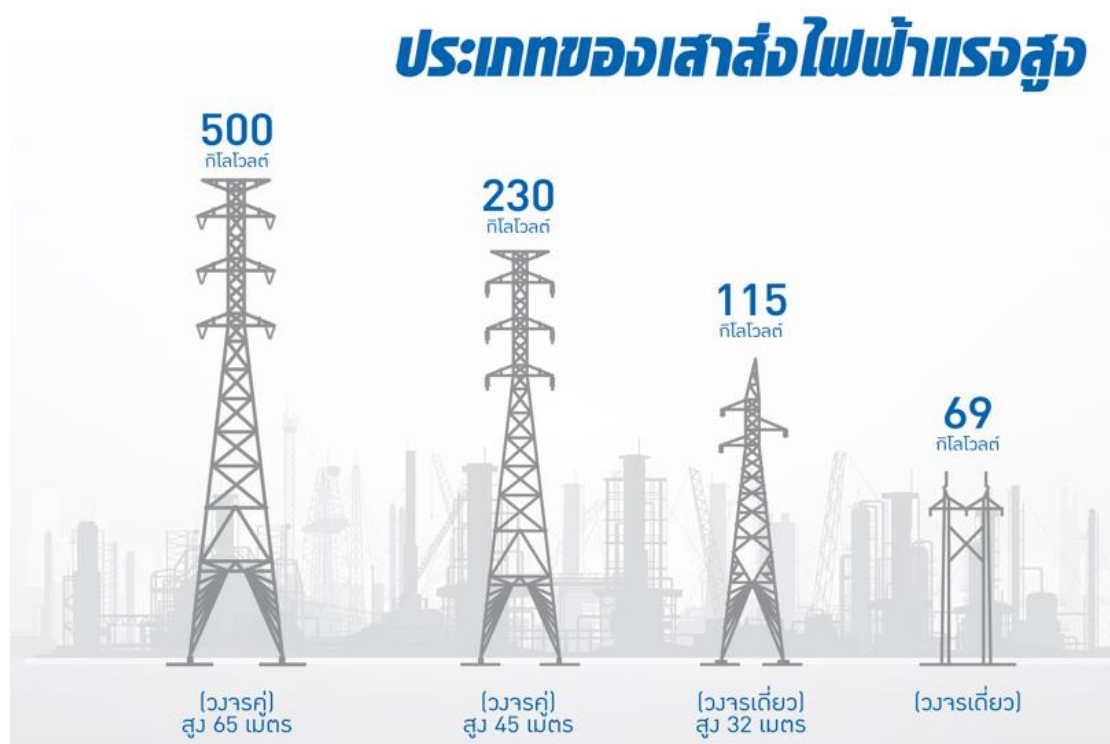
จากที่กล่าวมา ระบบส่งกำลังไฟฟ้าทำการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยัง  
ผู้ใช้หรือแหล่งจ่ายไฟ ที่ทราบกันว่าการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังศูนย์กลางการจ่ายโหลด จากนั้นทำการ  
เชื่อมโยงระบบส่งกำลังไฟฟ้าเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ (reliability) และลดความสูญเสีย  
ในระบบไฟฟ้า

### 3. ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

ระบบนี้จะทำการรับแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยทำการ  
จำหน่ายไฟฟ้าไปสู่บ้าน ชุมชน โดยสายส่งไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปจะส่งจำหน่ายด้วยสายส่งแรงสูงเหนือ  
ศีรษะ (overhead transmission lines) ที่พาดเสาลอยในอากาศเหนือพื้นดิน เป็นระบบสายส่งที่พบ  
เห็นและใช้กันอยู่เป็นจำนวนมากในปัจจุบันจะมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งเทคนิควิธีการเลือกการวาง  
สายบนเสาส่งลักษณะของสายตัวนำและลักษณะของเสาส่งที่ขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ  
ส่งจ่ายระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายและสภาวะแวดล้อมของสถานที่ที่พาดสายไปเป็นสำคัญ  
นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงสภาวะดินฟ้าอากาศ ความดัน และอุณหภูมิใช้งานของสถานที่นั้นๆ เพื่อ  
จะได้ออกแบบให้สามารถ รับแรงทางกล (mechanical loading) ได้เหมาะสมสิ่งที่สำคัญที่ต้อง  
คำนึงถึงอย่างมากก็คือการเกิด ปรากฏการณ์โคโรนา (corona phenomena) บนสายส่งแรงสูง และ  
ผลกระทบที่ตามมาของโคโรนา (corona effect) ซึ่งจะเป็นตัวก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียส่วนหนึ่ง  
ของระบบสายส่ง เรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียโคโรนา (corona loss) และยังต้องคำนึงถึงค่ากระแส  
อัดประจุ (charging current) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของสมมุติฐานทางไฟฟ้า  
ของระบบสายส่งและจะต้องควบคุมไม่ให้มากเกินไป ทั้งหมดนี้ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ดีจะต้อง  
มีขีดความสามารถเพียงพอ ที่จะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของผู้ใช้ต้องให้มีความมั่นคง

นำเชื้อถ่านหินมาผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟให้เครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม และสามารถใช้สำหรับผลิตเหล็กกล้า และถลุงแร่โลหะต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟให้ระบบส่งจ่ายพลังงานซึ่งจะมีเสาจำหน่ายไฟฟ้าสู่บ้านเรือน ชุมชนโดยมีลักษณะพื้นฐานของโครงสร้างทางกล ของเสาส่งของระบบส่งจ่ายกำลัง ดังภาพประกอบ 10

จากที่กล่าวมาทั้งสามระบบจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ในรูปแบบหน้าที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ระบบการทำงานนั้นๆ



ภาพประกอบ 11 ลักษณะโครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้ารูปแบบต่างๆของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ที่มา <https://www.egat.co.th/images/news-egat/2560/08/20170830-ART01-06.png>

### ผลกระทบหรืออันตรายจากสนามไฟฟ้า

โดยธรรมชาติในร่างกายของคนจะมีกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการดำรงชีวิตและเป็นส่วนที่สำคัญ ร่างกายจะถูกส่งงานด้วยการกระตุ้นของกระแสไฟฟ้าผ่านประสาททั้งหลายเพื่อให้ร่างกายทำงานอย่างปกติ ปฏิกริยาทางชีวเคมีส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางไฟฟ้าตั้งแต่กระบวนการย่อยอาหารจนถึงการทำงานของสมอง ซึ่งผลกระทบของการสัมผัสโดยหลักๆ แล้วจะ



ขึ้นอยู่กับ ค่าความถี่ และ ขนาด ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ ค่าความถี่ต่ำ (50 Hz) ซึ่งเป็นของระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็กจะผ่านร่างกายไป ในขณะที่ระดับความถี่วิทยุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบางส่วนจะถูกดูดกลืนผ่านเข้าสู่ร่างกายของคน โดยในทางทฤษฎีจะพบว่าเมื่อยืนอยู่ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีการติดตั้งตามมาตรฐานแล้ว สนามไฟฟ้าจะผ่านร่างกายโดยจะมีประจุไฟฟ้ากระจายสะสมบนผิวของร่างกายและทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายลงสู่พื้นดิน ในขณะที่ สนามแม่เหล็กจะผ่านร่างกายและจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนภายในร่างกายตามปกติเหมือนที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่อยู่ในชีวิตประจำวัน จะทำให้เห็นได้ว่าผลกระทบหรืออันตรายจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อคนและสัตว์

จึงมีการติดตั้งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐานและควบคุมค่าสนามไฟฟ้าที่มีความปลอดภัยให้เป็นไปตามที่ WHO กำหนด ซึ่งได้ร่วมกับหน่วยงาน international commission non-ionizing radiation protection (ICNIRP) ทำการวิจัย และพัฒนาด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยได้กำหนดระดับสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำ

ตาราง 1 ค่ามาตรฐานของค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละสถานที่

สถานที่	ระยะเวลา	สนามไฟฟ้า
สถานประกอบการ	ตลอดชั่วโมงการทำงาน	10 kV/m
สาธารณะ	ตลอดทั้งวัน	5 kV/m

### วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization)

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) เกิดขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการแก้ไขโจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเหมาะสมที่สุด แต่ปัญหาส่วนใหญ่เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มาจากหลักพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของระบบนั้นๆก่อนปี ค.ศ. 1940 วิธีที่ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ของฟังก์ชันที่มีหลายตัวแปรนั้นมีไม่มากนัก เช่น การทำ least square ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านฟิสิกส์บางประเภท แต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับ คือการทำ newton method ซึ่งถูกนำมาใช้กับปัญหาของระบบที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางเคมีโดยในช่วงปี ค.ศ. 1940 - ค.ศ. 1950 มีการแนะนำสาขาใหม่ทางการหาค่าเหมาะสมที่สุด ที่เรียกกันว่ากำหนดการเชิงเส้น (linear programming) จากนั้นได้มีการศึกษา และพัฒนากัน

มาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันนี้ได้มีการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด มาใช้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น

ในปัจจุบันนี้การหาค่าเหมาะสมที่สุด ไม่ได้จำกัดอยู่แค่สาขาวิชาทางด้านวิศวกรรม แต่กลายมาเป็นสิ่งสำคัญในทุกๆสาขาวิชาโดยเฉพาะทางด้านเศรษฐศาสตร์การทำหาค่าเหมาะสมที่สุด ถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีการนำหลักการของการหาค่าเหมาะสมที่สุด มาช่วยในเรื่องของเงินทุน และผลกำไร เช่น การลดต้นทุนการผลิต และการเพิ่มผลผลิต เป็นต้น สำหรับในด้านอื่นๆ เช่น สาขาทางด้านการบินและยานอวกาศ มีการใช้หลักการของการหาค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อหาเส้นทางการบินจากโลกไปที่ดวงจันทร์และกลับลงมายังโลกอีกครั้ง โดยใช้เชื้อเพลิงให้น้อยที่สุด หรือการหาโครงสร้างของเครื่องบินที่มีมวลน้อยที่สุด เป็นต้น

สำหรับในภาคอุตสาหกรรมนั้นการตัดสินใจที่จะปรับปรุงให้ได้สิ่งที่ดีที่สุดเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้ง ตัวอย่างเช่น การหาค่าเหมาะสมที่สุด ของกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตทั้งหมด การลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่างๆ ซึ่งผู้จัดการต้องมีการวางแผนการทำงานที่ดีเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ในด้านต่างๆ ให้ได้ตามที่ต้องการ และในทางเดียวกันวิศวกรต้องออกแบบระบบใหม่ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นแต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยลง บางปัญหาที่เกิดกลายเป็นเรื่องยุ่งยากขึ้นมา เมื่อผู้จัดการหรือวิศวกรพบกับทางเลือกมากมายในการแก้ไขปัญหาเหล่านั้น

เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับ ที่เรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ที่ทันสมัย (modern optimization method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่มีแบบแผน (nontraditional) และได้มีการนำวิธีนี้เข้าไปร่วมกับสาขาวิชาทางด้านพันธุศาสตร์ เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) การจำลองการอบเหนียว (simulated annealing: SA) ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization) ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณานิคม (ant colony optimization) ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบโครงข่ายประสาท (neural network-based optimization) และการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีด้านวิวัฒนาการ (multi-objective evolutionary algorithm) โดยการใช้วิธีการทันสมัย (modern method) เข้ากับ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1975 โดย John Holland และการใช้วิธีการทันสมัย (modern method) การจำลองการอบเหนียว (simulated annealing: SA) ถูกคิดค้นและพัฒนาโดย Kirkpatrick Gelatt และ Vecchi สำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1995 โดย Kennedy และ Eberhart สำหรับขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณานิคม (ant colony optimization) ถูกคิดค้นขึ้นใน

ปี ค.ศ.1992 โดย Marco Dorigo และขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบโครงข่ายประสาท (neural network-based optimization) เป็นวิธีการคำนวณคล้ายกับโครงข่ายระบบประสาทซึ่งได้มีการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด เข้ากับโครงข่ายประสาทเทียมที่เป็นการจำลองมาจากสมอง (neural network) ครั้งแรกในปี ค.ศ.1985 โดย Hopfield และ Tank และสุดท้ายวิธี การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีด้านวิวัฒนาการ (multi-objective evolutionary algorithm) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1994 โดย Srinivas & Deb

โดยหลักการพื้นฐานของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของการหาค่าตอบ นำไปประยุกต์ใช้ ได้กับหลายสาขาวิชาดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยหลักการหาค่าเหมาะสมที่สุด เป็นขบวนการทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่ง ซึ่งจะให้ผลในเชิงปริมาณ (quantity) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำนวน หรือค่าของตัวเลขของปัญหาที่กำหนด ดังนั้นปัญหาที่นำมาเลือกใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด จะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จุดประสงค์ของการหาค่าเหมาะสมที่สุด คือ เพื่อต้องการหาค่าสูงสุด (maximum) หรือค่าต่ำสุด (minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด (objective function) และการหาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บางครั้ง อาจจะมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่เรียกว่า ข้อจำกัด (constraints) ไว้ด้วย

ดังนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุด คือการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และการกำหนดข้อจำกัด เพื่อใช้ในการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดในการหาค่าเหมาะสมที่สุด

### วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization)

แนวคิดและความเป็นมาของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization) ใน ปีค.ศ.1995 J. Kennedy and R. Eberthart ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีแบบกลุ่มอนุภาค คือ การจำลองพฤติกรรมทางสังคมของฝูงนกมาเป็นขั้นตอนวิธีในการ ค้นหาคำตอบ โดยอาศัยความน่าจะเป็น จากการจำลองพฤติกรรมของการออกไปหาอาหารของนก ซึ่งนกในฝูงจะช่วยกันออกไปหาอาหาร และแต่ละตัวจะไม่รู้ล่วงหน้าถึงสถานที่ที่มีอาหารอยู่แต่ ละครั้งของการบินออกไปหาอาหาร นกจะเรียนรู้ด้วยการติดต่อสื่อสารกันภายในฝูงถึงระยะทางในการ ออกไปหาอาหาร ดังนั้นเมื่อตัวใดตัวหนึ่งพบอาหารจะเกิดการเปรียบเทียบเพื่อไปยังแหล่งอาหารที่ อยู่ใกล้ที่สุดที่ค้นพบจากพฤติกรรมดังกล่าวของฝูงนก โดยนกแต่ละตัวจะถูกเรียกใหม่ด้วยคำ ว่า อนุภาค (particle) และทุกๆ อนุภาคจะมี fitness values ซึ่งจะถูกระเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) การบินของนกหากมองเป็นพารามิเตอร์จะประกอบด้วย ตำแหน่งนกบินอยู่ (position) โดยนำมาแปลงเป็นค่าน้ำหนัก ที่ใช้ตั้งค่าให้กับเครือข่ายไอเอสพีเอฟและความเร็วของ

การ เคลื่อนที่ (velocity) ดังนั้นในหนึ่งอนุภาคเมื่อแทนด้วย พารามิเตอร์ของปัญหาหนึ่งจะ ประกอบด้วยตัวแปร

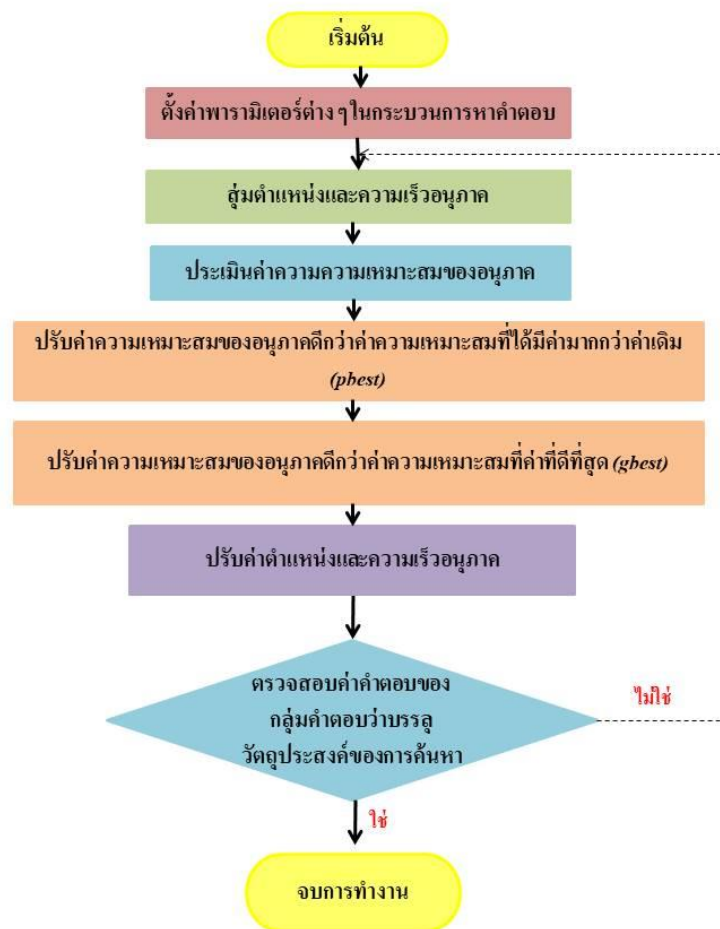
ซึ่งจากแนวคิดของวิธีการ PSO จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มหาตำแหน่งของอนุภาคของคำตอบที่เป็นไปได้ขึ้นมาชุดหนึ่ง จากนั้นก็จะหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการปรับปรุงค่าในแต่ละรอบของการตัดสินใจ โดยที่อนุภาคแต่ละตัวจะมีการปรับปรุงค่าด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งตามค่าที่ดีที่สุด (best) ซึ่งมี 2 ค่า ได้แก่

1. ค่าที่ดีที่สุดของอนุภาค ( $p_{best}$  : particle best) คือค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของการเคลื่อนที่ที่ผ่านมาของตัวมันเอง
2. ค่าที่ดีที่สุดของสากล ( $g_{best}$  : global best) คือค่าที่เป็นค่าที่ดีที่สุดการเคลื่อนที่ที่ผ่านมาของทั้งกลุ่ม (ฝูง)

การทำงานของวิธีการ PSO เป็นกระบวนการที่ทำงานเป็นรอบ (iteration) ซึ่งในแต่ละรอบของการทำงานความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวจะถูกปรับปรุงโดยมีตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัว คือ

1. ความเร็วปัจจุบันของอนุภาคนั้น (velocity)
2. ข้อมูลที่อนุภาคมีอยู่ ( $p_{best}$ )
3. ข้อมูลรวมของอนุภาคทั้งกลุ่ม ( $g_{best}$ )

จากนั้นวิธีการ PSO มีอัลกอริทึมวิธีหาค่าเหมาะสมเป็นอัลกอริทึมเชิงประชากรโดยใช้หลักการทำงานร่วมมือกันในการแก้ปัญหาของอนุภาค สิ่งที่น่าสนใจในวิธีการ PSO คือความเรียบง่ายของอัลกอริทึม และกระบวนการคิดทำให้นำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพแผนผังพื้นฐานการทำงานของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคโดยแสดงในแผนผังอัลกอริทึม ดังภาพประกอบ 11 สามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอนนี้



ภาพประกอบ 12 แผนผังอัลกอริทึมของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค  
(particle swarm optimization: PSO)

การเคลื่อนที่เป็นกลุ่มประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค โดยที่แต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบของระบบที่ต้องการหาโดยตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลของสภาวะแวดล้อมที่เคลื่อนที่ผ่านมา และข้อมูลจากอนุภาคภายในกลุ่มด้วยตัวเอง

โดยการสร้างการอัลกอริทึมวิธีการ PSO มีดังนี้

1. ทำการสุ่มเวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วของแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร  
เวกเตอร์ ตำแหน่งของอนุภาคมีมิติเท่ากับ  $N$  ซึ่งเป็นขนาดของตัวแปรในปัญหาที่ต้องการค้นหา ดังนั้น สามารถมองตำแหน่งของอนุภาคในรูปเวกเตอร์  $\vec{p}_i(t)$  ขนาด  $N$  และค่าสุ่มความเร็วของแต่ละอนุภาคจะมีขนาดเท่ากับ  $N$  ด้วย โดยเรียกว่า เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) กำหนดให้เป็น  $\vec{v}_i(t)$  ซึ่งแต่ละ

องค์ประกอบของเวกเตอร์ความเร็วจะเป็นค่าความเร็วของแต่ละตัวแปรในอนุภาคนั้นเอง ดังนั้นตำแหน่งของอนุภาค  $p_i$  จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยการบวกเวกเตอร์ตำแหน่งเข้ากับความเร็วดังสมการ

$$\bar{p}_i(t) = \bar{p}_i(t-1) + \bar{v}_i \quad (50)$$

2. ทำการประเมินค่าความเหมาะสม F ของแต่ละอนุภาค ซึ่งการประเมินค่าดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหา ค่าความเหมาะสมที่ได้จากการประเมินจะถูกพิจารณาในสองขั้นตอนดังนี้

- ถ้าความเหมาะสมของอนุภาค  $p_i$  มีค่าดีกว่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของทั้ง กลุ่มอนุภาค ให้ทำการบันทึกเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นไว้ โดยเรียกค่าความเหมาะสมนี้ว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (global best fitness) หรือ  $p_{best}$  กล่าวคือ ถ้า  $F(\bar{p}_i(t)) < g_{best}$  ในกรณีนี้หาค่าที่น้อยที่สุดให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมของระบบและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นๆ โดยใช้สมการ

$$g_{best} = F(\bar{p}_i(t)) \quad (51)$$

และ

$$\bar{g}_{best} = \bar{p}_i(t) \quad (52)$$

- ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาค  $p_i$  มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า  $p_{best_i}$  กล่าวคือ  $F(\bar{p}_i(t)) < p_{best_i}$  ถ้าให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมของระบบและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นไว้ใน  $p_{best_i}$  โดยใช้สมการ

$$p_{best} = F(\bar{p}_i(t)) \quad (53)$$

และ

$$\bar{p}_{best} = \bar{p}_i(t) \quad (54)$$

1. ทำการปรับความเร็วของอนุภาค

$$\bar{v}_i(t) = \bar{v}_i(t-1) + \bar{\rho}_p[\bar{p}_{pbest_i} - \bar{p}_i(t)] + \bar{\rho}_g[\bar{p}_{gbest_i} - \bar{p}_i(t)] \quad (55)$$

โดยที่  $\rho_p$  และ  $\rho_g$  เป็นตัวแปรสุ่มเทอมที่สองของสมการข้างต้น เรียกว่า องค์ประกอบเชิงปริชาาน (cognitive component) และเทอมสุดท้ายเรียกว่า องค์ประกอบทางสังคม (social component)

2. ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค  $p_i$

$$\bar{p}_i(t) = \bar{p}_i(t-1) + \bar{v}_i \quad (56)$$

3. ทำการปรับค่าตัวแปรเวลา  $t=t+1$  และดำเนินขั้นตอนทั้งหมดกับอนุภาคถัดไปในกลุ่มประชากร จนครบทุกอนุภาค

4. วนรอบการทำงานทั้งหมดจนกระทั่งมีการลู่เข้าสู่คำตอบของอนุภาคที่ดีที่สุดในกลุ่มหรือตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยรูปแบบการค้นหาและลักษณะการลู่เข้า หากคำตอบที่ดีที่สุดแสดงไว้ในภาพประกอบ 11

โดยทั่วไปจะทำการกำหนดรอบในการค้นหาไว้ หรือกำหนดเงื่อนไขในการสิ้นสุดการค้นหาเมื่อได้ค่า  $g_{best}$  ที่บรรลุนิติประสงค์แต่ละองค์ประกอบของเวกเตอร์อนุภาคที่ได้คือตัวแปรของปัญหาที่ต้องการค้นหานั้นเององค์ประกอบเชิงปริชาานแทนประสบการณ์การค้นหาคำตอบของแต่ละอนุภาค ในขณะที่องค์ประกอบเชิงสังคมแทนประสบการณ์การค้นหาของกลุ่มอนุภาค ถ้าไม่พิจารณาองค์ประกอบเชิงสังคมในการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็ว อัลกอริทึมนี้จะถูกเรียกว่าเป็นแบบเฉพาะที่ (local best) ค่าของ  $\rho_p$  เป็นพารามิเตอร์ที่มีค่าสุ่มและกำหนดขนาดโดยผู้ใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวใช้จำกัด ขนาดเส้นทางเดินของอนุภาคออกจากตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ค่า  $\rho_p$  ที่มากจะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง (oscillate) ในขณะที่ค่า  $\rho_p$  มีค่าน้อยจะทำให้เส้นทางเดินมีความเรียบ (smooth) ในทำนองเดียวกัน ค่า  $\rho_g$  เป็นพารามิเตอร์ที่จำกัดเส้นทางเดินของกลุ่มอนุภาคทั้งค่า  $\rho_p$  และ  $\rho_g$  จะถูกกำหนดเป็น  $\rho_p = r_p c_p$  และ  $\rho_g = r_g c_g$  โดยที่  $r_p, r_g \in (0,1)$   $c_p$  และ  $c_g$  เป็นค่าคงที่ความเร่ง (acceleration constant) โดยมีค่าเป็นบวกทั้งคู่

ในวิธีการ PSO จะมีพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อการค้นหาคำตอบของวิธีการซึ่งได้แก่ ค่าคงที่ความเร่ง ( $c_p$  และ  $c_g$ ) ค่าช่วงเวลาระหว่างรอบ และจำนวนอนุภาคในกลุ่มการเคลื่อนที่ ซึ่งมียละเอียดดังนี้

1. ค่าคงที่ความเร่ง (acceleration constant) ใช้กำหนดการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคในกลุ่ม โดย  $c_p$  จะมีอิทธิพลต่อ  $pbest$  ของอนุภาคนั้นๆ ในขณะที่  $c_g$  จะมีอิทธิพลต่อ  $gbest$  ถ้า  $c_g > c_p$  จะส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่รอบๆ คำตอบที่ดีที่สุด (global) และถ้า  $c_p > c_g$  แต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่รอบๆ คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น (local) ของอนุภาคนั้นๆ กล่าวคืออนุภาคจะเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระต่อกัน
2. ค่าช่วงเวลาระหว่างรอบ (time interval) เป็นการกำหนดระยะเวลาห่างของการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะได้รับการปรับหรือเปลี่ยนแปลงค่าช่วงเวลาน้อยจะทำให้การเคลื่อนที่มีความละเอียดขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะมากขึ้น และค่าช่วงเวลาที่มากจะทำให้การเคลื่อนที่มีขนาดมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะน้อยลง
3. จำนวนของอนุภาคภายในกลุ่มเป็นปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการค้นหาของระบบโดยตรง จำนวนอนุภาคที่มากจะทำให้ระบบครอบคลุมปริภูมิการค้นหาที่กว้างกว่า อย่างไรก็ดี เมื่อจำนวนอนุภาคมาก เวลาที่ใช้ในการค้นหาก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่จะเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด ในวงกว้าง (global) ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหา ดังนั้นการใช้งานวิธีการ PSO จะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละแบบ



### บทที่ 3

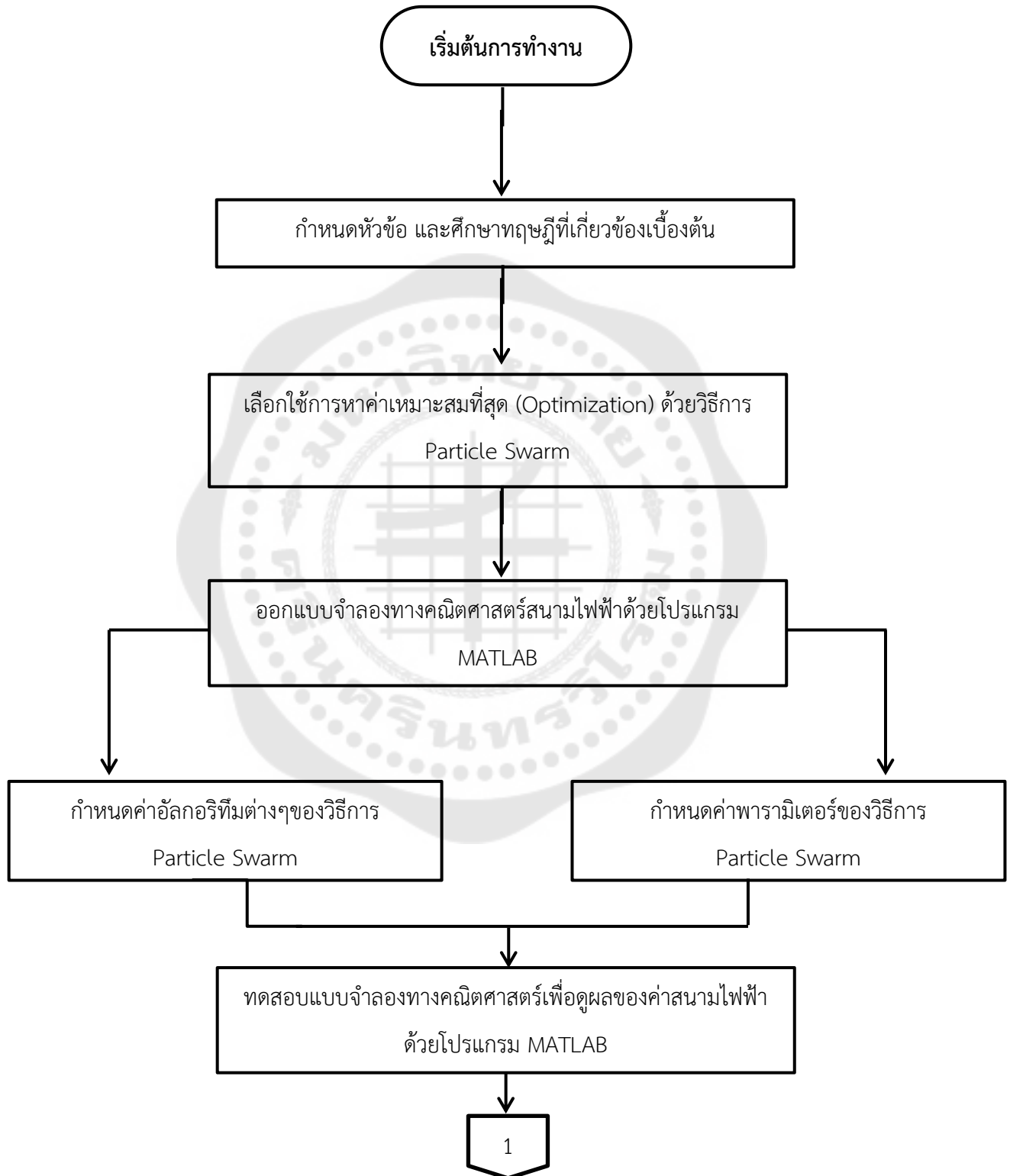
## วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาเรื่องการหาค่าเหมาะสมที่สุด ด้วย PSO ของสนามไฟฟ้าโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่น้อยที่สุดในวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ตลอดจนศึกษาถึง PSO ที่นำมาใช้ในการทำงานวิจัยซึ่งใช้การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม MATLAB และสามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินการของงานวิจัยวิศวกรรมดังต่อไปนี้โดยมีวิธีดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

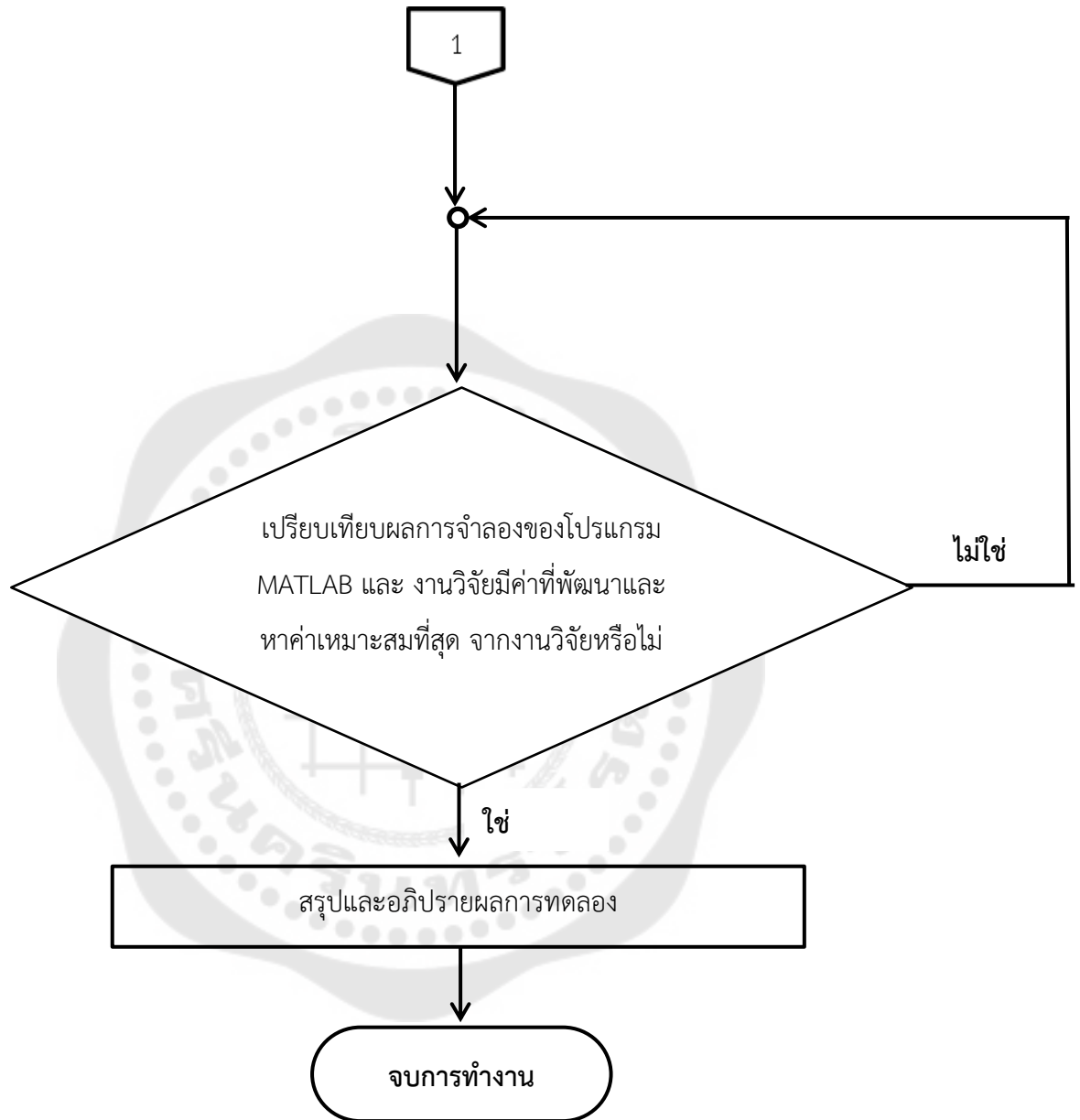
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. สืบค้นหัวข้อที่สนใจเพื่อกำหนดหัวข้องานวิจัยที่จะศึกษา และศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น
2. สืบค้นข้อมูลของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
3. นำข้อมูลที่สืบค้นมาศึกษาเกี่ยวกับค่าสนามไฟฟ้าในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ส่งผลต่อร่างกายเพื่อทำความเข้าใจรูปแบบการหาค่ามุมเฟสที่เกี่ยวข้อง
4. สืบค้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าสนามไฟฟ้าในในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization)
5. สืบค้นข้อมูลของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ PSO
6. ออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการ PSO
7. ทดสอบแบบจำลองที่ออกแบบเพื่อดูผลของค่าสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB
8. ทดสอบแบบจำลองที่ออกแบบเพื่อดูผลของค่าสนามไฟฟ้าโดยเทียบค่าสนามกับงานวิจัยที่ศึกษาเพื่อดูว่ามีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ขึ้น
9. หากเกิดปัญหา สืบค้นที่มาของปัญหาทำการแก้ไขเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป
10. เปรียบเทียบผลค่าสนามไฟฟ้าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการ PSO และค่าสนามไฟฟ้าจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำมาศึกษาค้นคว้า

## แผนผังการทำงานโดยรวมของงานวิจัย



ภาพประกอบ 13 แผนผังการทำงาน



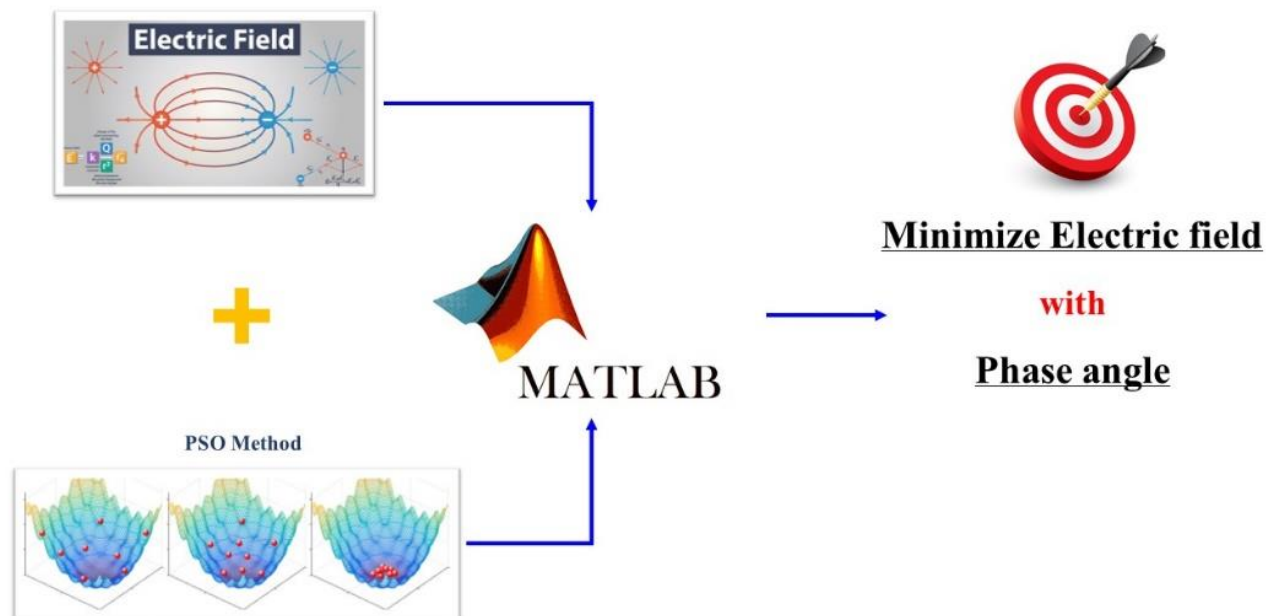
ภาพประกอบ 14 แผนผังการทำงาน (ต่อ)

จากแผนผังการทำงานที่แสดงข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงแผนการดำเนินการที่ทำงานวิจัยนี้ ซึ่งในส่วนเริ่มต้นของการทำงานนั้น ก็จะมีการกำหนดหัวข้อเพื่อทำการศึกษาวิจัย เมื่อได้หัวข้อในการศึกษาวิจัยนี้แล้วก็จะทำการสืบค้นข้อมูลเพื่อหาความรู้เกี่ยวกับทฤษฎี จากนั้นทำการ

ออกแบบและเขียนโปรแกรมเพื่อหาผลลัพธ์ของคำตอบของงานวิจัย เมื่อได้ผลลัพธ์ออกมาก็ทำการตรวจสอบความถูกต้อง และเมื่อถูกต้องก็ทำการแสดงผลรวมถึงสรุปผลและอธิบายผลให้เห็นถึงงานวิจัยที่ได้ทำทั้งหมดนี้

### วิธีการดำเนินงานในการหาคำตอบ

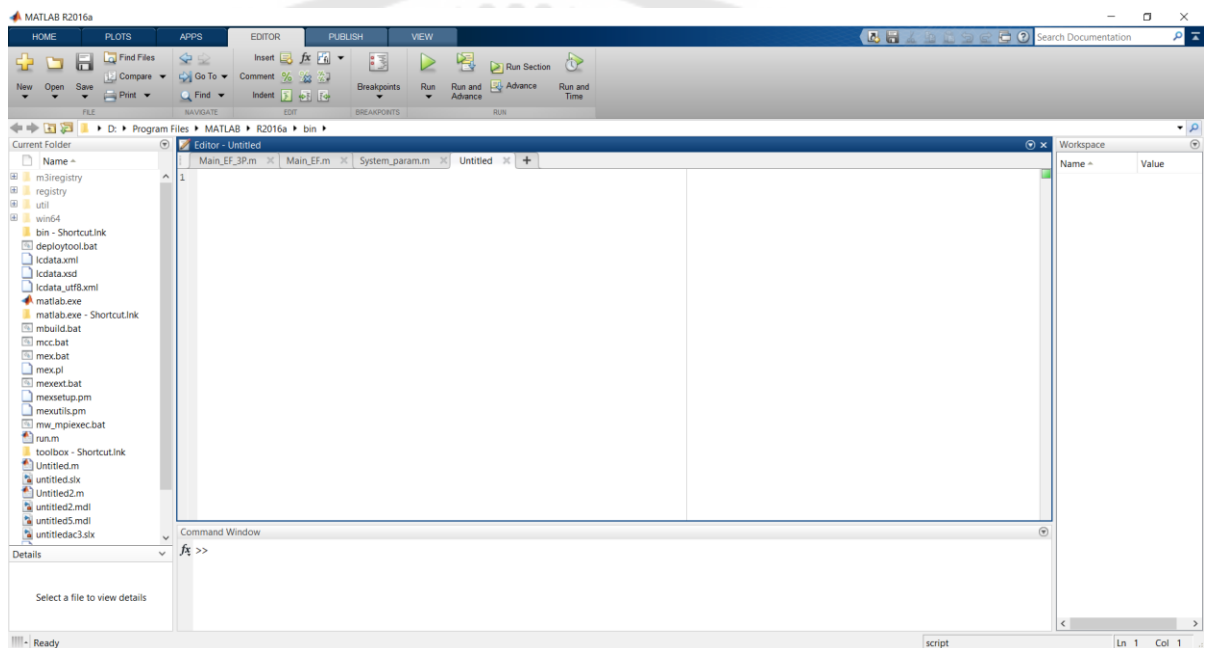
จากที่กล่าวมาการดำเนินการในการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด จากการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB รวมถึงได้มุมเฟสของแรงดันที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอีกด้วย โดยการดำเนินการก็จะแสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 16 ซึ่งสามารถอธิบายจากภาพได้ว่างานวิจัยนี้ จะทำการหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการพิจารณา จากนั้นทำการเลือกใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยการเลือกใช้กระบวนการ PSO เมื่อได้ทั้งสองอย่างแล้วนำมาเขียนผ่านโปรแกรม MATLAB และจะส่งผลให้ได้ค่าคำตอบของสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดและมุมเฟสของแรงดันที่เกิดจากเสาส่งไฟฟ้าที่ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำที่สุด ซึ่งในหัวข้อนี้จะประกอบด้วย อุปกรณ์จำลอง, การหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และกระบวนการ PSO ตามลำดับ



ภาพประกอบ 15 แผนภาพกระบวนการหาคำตอบของงานวิจัย

## 1. อุปกรณ์จำลอง

ในการทำการคำนวณเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าจำเป็นจะต้องมีโปรแกรมต่างๆมาช่วยในการคำนวณหาค่าและสร้างกราฟจากผลการคำนวณ เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ศึกษาซึ่งโปรแกรมที่นำมาใช้มีดังนี้ คือ โปรแกรม MATLAB โดยจะทำหน้าที่ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าสามารถแสดงผลเป็นตัวเลขและรูปภาพซึ่งสามารถทำการเขียนกราฟ ลักษณะการเขียนโปรแกรมใน MATLAB จะใกล้เคียงการเขียนสมการคณิตศาสตร์โดยทั่วไป และสามารถควบคุมการทำงานของ MATLAB และกระบวนการออกแบบของการทำงานวิธีการ PSO

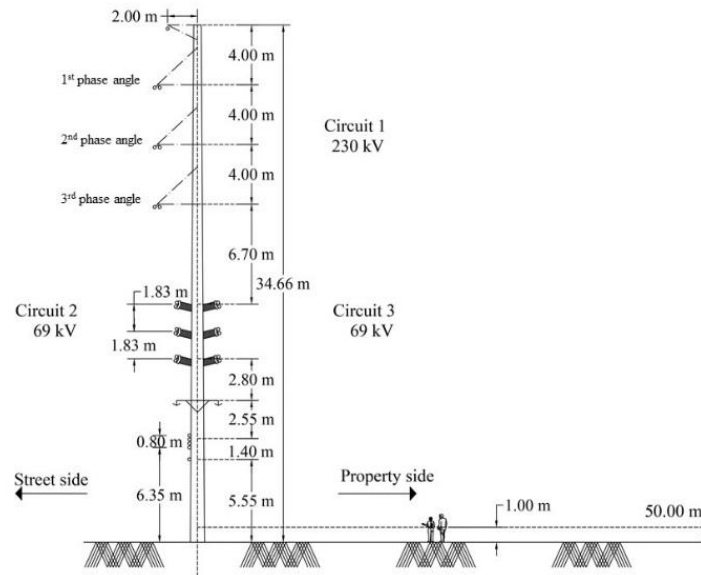


ภาพประกอบ 16 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB

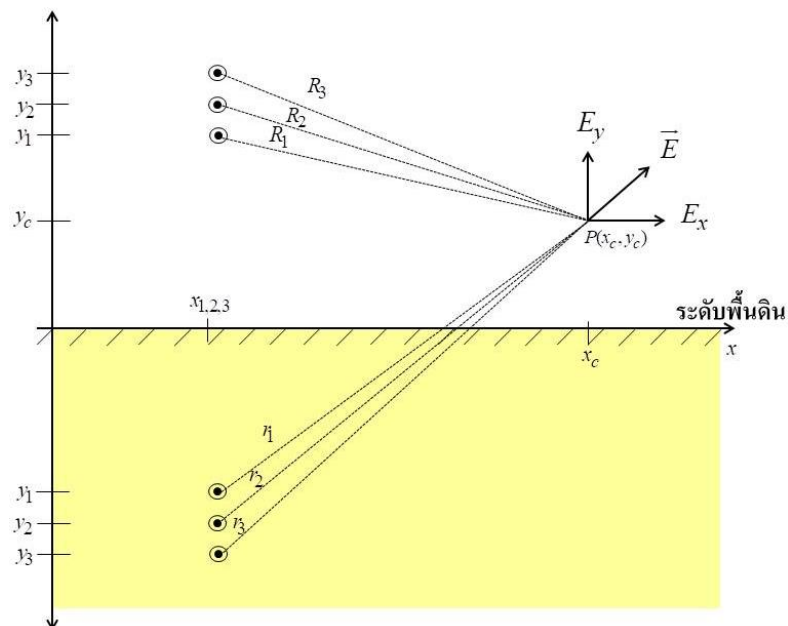
## 2. การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยคำตอบของสนามไฟฟ้าและมุมเฟสของแรงดันที่ต้องการ โดยจะมาเริ่มกันที่การจำลองที่ต้องใช้สมการสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ที่มาใช้ในการพิจารณาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เข้ามาช่วยในการหาคำตอบดังนี้

$$\vec{E} = \frac{V \angle \theta}{R \ln\left(\frac{y}{a}\right)} (\cos \theta \vec{a}_x + \sin \theta \vec{a}_y) \tag{57}$$



ภาพประกอบ 17 แผนภาพจำลองของสายส่งกำลังไฟฟ้า



ภาพประกอบ 18 แผนภาพของสายส่งสำหรับการคำนวณสนามไฟฟ้า

จากนั้นพิจารณาตามภาพโดยหาค่าจากวงจรถาม ภาพประกอบ 19 โดยจะแสดงดัง  
สมการนี้

$$\vec{E}_A = \frac{V_1 \angle \theta_1}{R_1 \ln\left(\frac{y_1}{a}\right)} (\cos \theta \vec{a}_x + \sin \theta \vec{a}_y) \quad (58)$$

$$\vec{E}_B = \frac{V_2 \angle \theta_2}{R_2 \ln\left(\frac{y_2}{a}\right)} (\cos \theta \vec{a}_x + \sin \theta \vec{a}_y) \quad (59)$$

$$\vec{E}_C = \frac{V_3 \angle \theta_3}{R_3 \ln\left(\frac{y_3}{a}\right)} (\cos \theta \vec{a}_x + \sin \theta \vec{a}_y) \quad (60)$$

$$\vec{E}_{A'} = \frac{-V_1 \angle \theta_1'}{r_1 \ln\left(\frac{y_1}{a}\right)} (\cos \theta \vec{a}_x + \sin \theta \vec{a}_y) \quad (61)$$

$$\vec{E}_{B'} = \frac{-V_2 \angle \theta_2'}{r_2 \ln\left(\frac{y_2}{a}\right)} (\cos \theta \vec{a}_x + \sin \theta \vec{a}_y) \quad (62)$$

$$\vec{E}_{C'} = \frac{-V_3 \angle \theta_3'}{r_3 \ln\left(\frac{y_3}{a}\right)} (\cos \theta \vec{a}_x + \sin \theta \vec{a}_y) \quad (63)$$

ซึ่งจะได้ค่าของสนามไฟฟ้าจากการคำนวณดังนี้

$$E_{total} = \left| \vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C + \vec{E}_{A'} + \vec{E}_{B'} + \vec{E}_{C'} \right| \quad (64)$$

แต่จากนั้นได้พิจารณาโดยคำนึงถึงมุมเฟสเป็นสำคัญจึงนำสมการข้างต้นมาเพื่อปรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ได้ดังนี้

$$E = \sum_{n=1} \frac{V \angle \theta_n}{R_n \ln\left(\frac{y_n}{a}\right)} (\cos \theta_n \vec{a}_x + \sin \theta_n \vec{a}_y) \quad (65)$$

ต่อจากนั้นจะถูกนำไปใช้ในโปรแกรมเพื่อไปใช้ในการคำนวณเฟสที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุด โดยภาพประกอบ 20 คือการแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของสมการที่กล่าวมาข้างต้น จะประกอบด้วยผลของค่าสนามไฟฟ้า 3 วงจรที่เกิดจากสายส่ง แต่ตามหลักทฤษฎีเมื่อเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นจะมีสนามไฟฟ้าสะท้อนจากพื้นดิน โดยจะให้  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  เป็นระยะที่เกิดจากสนามไฟฟ้าจริงเหนือผิวดิน ของวงจรที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และ  $r_1, r_2$  และ  $r_3$  เป็นระยะที่เกิดจากสนามไฟฟ้าสะท้อนจากผิวดิน ของวงจรที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยวงจรที่ 1 และ 2 จะมีค่าแรงดันที่ 69 kV และ วงจรที่ 3 มีค่าแรงดัน 230 kV จากนั้นจะนำค่าสนามที่เกิดทั้งหมดมาบวกรวมกันก็จะได้ค่าสนามที่เกิดที่จุดพิจารณา

### 3. กระบวนการทำงานในการหาค่าตอบของ PSO

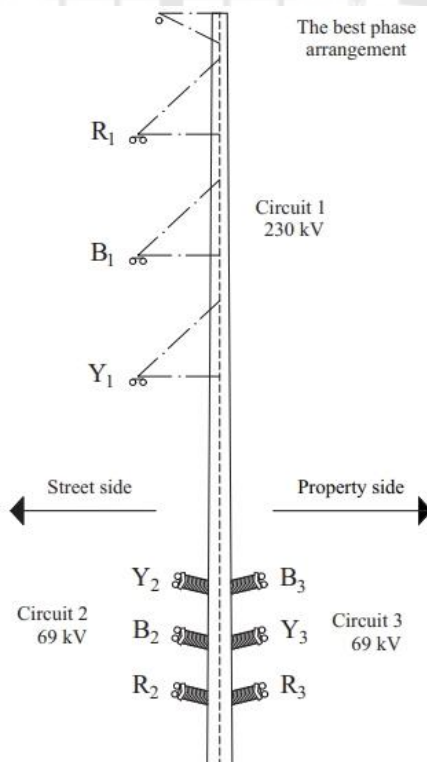
โดยในการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะแบ่งการหาค่าตอบออกเป็น 2 รูปแบบ โดยจะมีการนำสมการที่นำมาใช้ในการหาค่าตอบโดยใช้สมการของวิธีการ PSO ดังสมการที่ (66) และ 2 รูปแบบที่นำมาพิจารณาในการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการจัดเรียงเฟสที่ดีที่สุดมาทำการปรับและพัฒนาต่อภาพประกอบ 18 และ 19

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปแล้ว ก็จะต้องมาพิจารณากระบวนการทำงานของ PSO โดยจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ตามแผนภาพที่ปรากฏตามภาพประกอบ 18 ซึ่งจะพิจารณาค่าของตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการ PSO โดยตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาที่มีผลต่อการค้นหาค่าตอบคือ ค่าการเรียนรู้, จำนวนประชากร และ ค่าเริ่มต้น โดยทั้ง 3 ตัวแปรที่พิจารณานั้นมีผลต่อคำตอบ ความเร็วในการหาค่าตอบของกระบวนการ PSO ด้วยซึ่งการจำลองนี้มี 2 รูปแบบการกำหนดค่าต่างๆ จะต่างกัน ซึ่งรูปแบบที่ 1 จะประกอบด้วย  $\omega$  ที่ 0.5  $C_1, C_2$  เท่ากับ 2 และ 3 และรูปแบบที่ 2 จะประกอบด้วย  $\omega$  ที่ 0.5  $C_1, C_2$  เท่ากับ 2 และ 2.5 และกำหนดค่าจำนวนอนุภาคไว้ที่ 20 อนุภาค และการวนซ้ำในการหาค่าตอบ คือ 1000 รอบ ทั้งรูปแบบที่ 1 และ 2 จากที่กำหนดฟังก์ชันและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแล้ว จะนำมาสู่กระบวนการทำงานของ PSO เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยมีขั้นตอนดังนี้

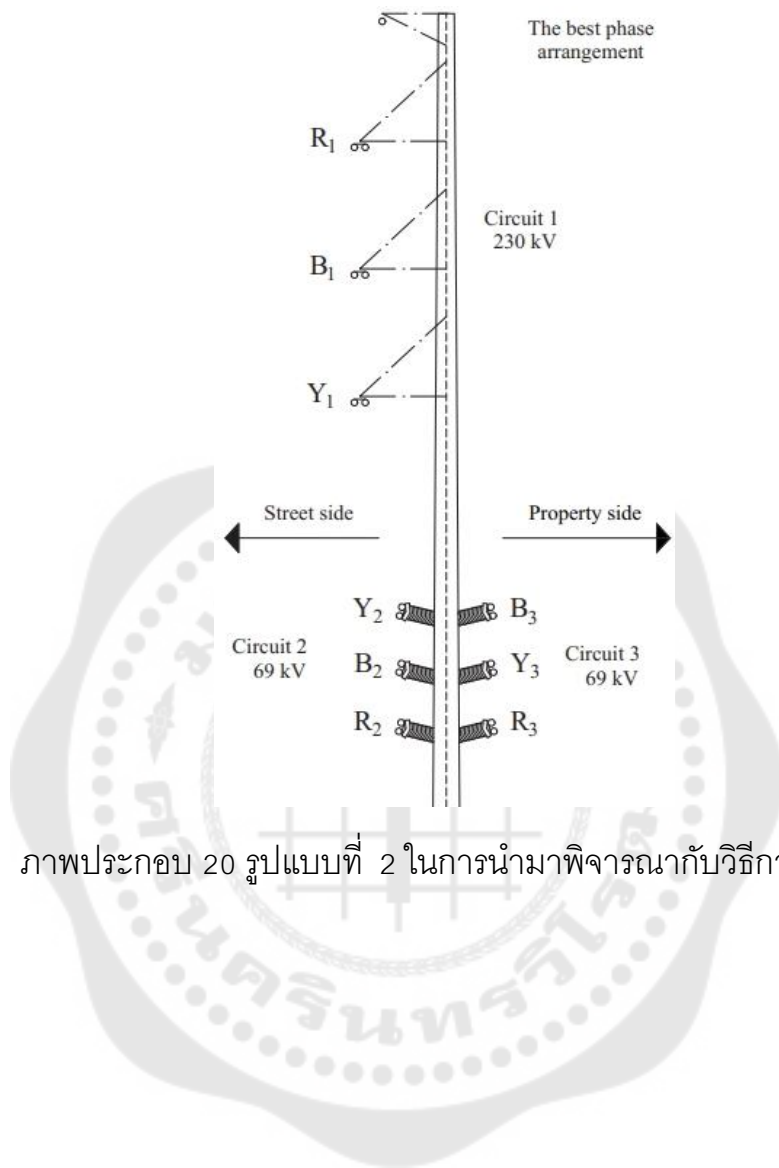


1. เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาแล้วจะทำมาผ่านกระบวนการ PSO
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่สนใจและต้องการกำหนด ดังนี้ ความเร็ว, จำนวนประชากร และค่าการเรียนรู้ที่กล่าวมาในข้างต้น
3. ทำการค้นหาคำตอบแบบสุ่มโดยการสุ่มตำแหน่งของคำตอบและประเมินความเหมาะสม
4. ปรับตำแหน่งคำตอบเพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด ( $p_{best}$ )
5. จากนั้นเมื่อได้  $p_{best}$  แล้วทำการหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด ( $g_{best}$ )
6. เมื่อได้คำตอบที่ดีที่สุดแล้วทำการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องตามเงื่อนไขที่พิจารณา เมื่อคำตอบถูกตรวจสอบว่าถูกต้องแล้วคำตอบก็จะแสดงผล แต่ถ้าคำตอบยังไม่ถูกต้องจะมีการวนเพื่อทำการค้นหาคำตอบที่ถูกต้องและแสดงผล ดังแผนผังการทำงานของกระบวนการ PSO ดังภาพประกอบ 20

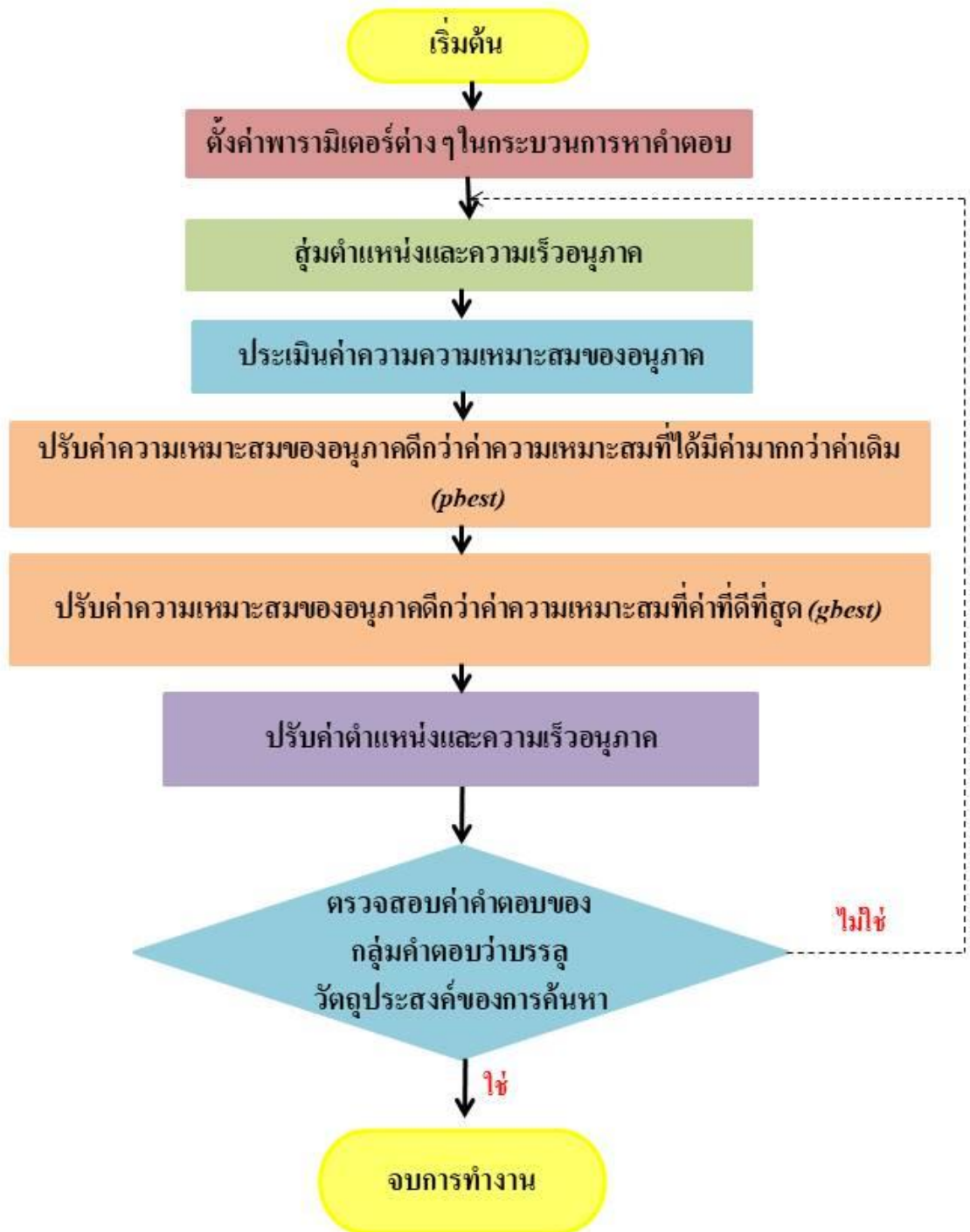
$$\bar{v}_i(t) = \omega \cdot \bar{v}_i(t-1) + c_1[\bar{p}_{pbest_i}] + c_2[\bar{p}_{gbest_i} - \bar{p}_i(t)] \quad (66)$$



ภาพประกอบ 19 รูปแบบที่ 1 ในการนำมาพิจารณากับวิธีการ PSO



ภาพประกอบ 20 รูปแบบที่ 2 ในการนำมาพิจารณากับวิธีการ PSO



ภาพประกอบ 21 แผนผังกระบวนการ PSO

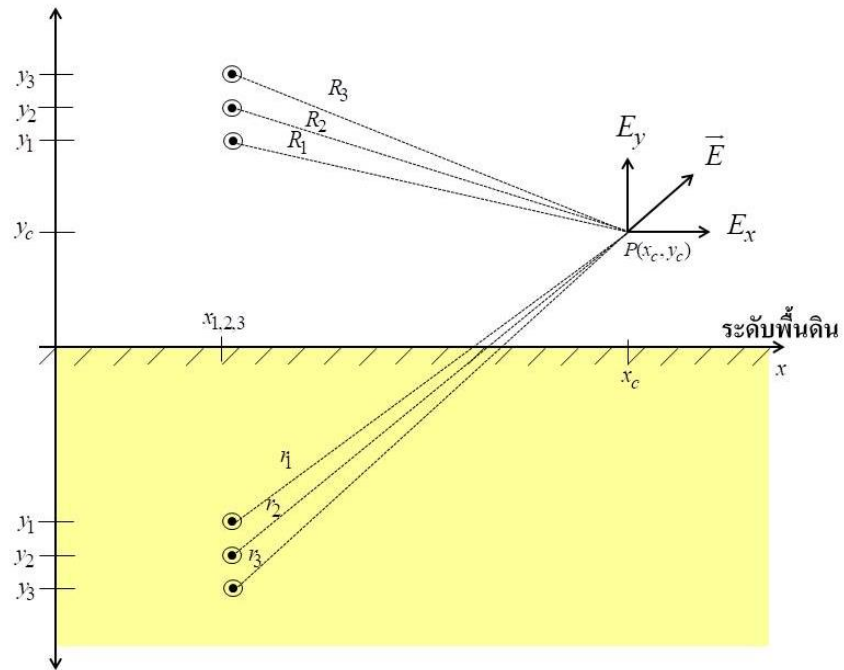
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในส่วนของบทที่ 4 จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดผลการจำลองเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าที่นำมาพิจารณา โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการทดสอบหาค่าสนามไฟฟ้า คือ เลือกรูปการพิจารณามุมเฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้า ร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยวิธีการ PSO ด้วยการทดสอบผลจากโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจะแสดงออกมาในรูปกราฟสัมพันธ์ของ  $x, y$  ซึ่งเงื่อนไขและขอบเขตต่างๆ จะส่งผลให้ค่าของสนามไฟฟ้าแตกต่างกันไปที่ตำแหน่งใดๆ และจะแสดงให้เห็นถึงการทำงานของวิธีการ PSO อีกด้วย จากนั้นการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้รับการหาค่าเหมาะสมที่สุด จากงานวิจัย ในกรณีต่างๆ ที่ถูกนำมาพิจารณา โดยมีรายละเอียด ดังนี้

จากงานวิจัยของ Suthasinee Nunchuen และ Vuttipon Tarateeraseth ได้ทำการหาปรับปรุงหาค่าสนามไฟฟ้าจากวิธีการจัดเรียงเฟสของสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งให้รูปแบบในการค้นหาคำตอบถึง 512 รูปแบบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด สามารถปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า และการจัดเรียงเฟสที่ดีนั้นสามารถลดลงจนมีค่าเพียง 0.03738 กิโลโวลต์ต่อเมตร จากวิธีการลองผิดลองถูก โดยงานวิจัยนี้ได้นำรูปแบบที่ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าลดลงต่ำสุดมาจากการจัดเรียงเฟสที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำสุดมาพัฒนาและปรับปรุงเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ของสนามไฟฟ้าอีกจาก 2 รูปแบบที่นำมาพิจารณา ดังภาพประกอบ 19 ซึ่ง 2 รูปแบบนี้ความแตกต่างในการจัดเรียงเฟสที่ต่างกัน โดยงานวิจัยนี้ได้นำรูปแบบที่ส่งผลให้ได้ค่าสนามไฟฟ้ามาปรับปรุงและพัฒนาเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำลงด้วยวิธีการ PSO ร่วมกับการปรับมุมเฟสของแรงดันเพื่อค่าสนามไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นจากรูปแบบที่นำมาปรับปรุง โดยจะส่งผลต่อมนุษย์ที่ได้รับการสัมผัสกับสนามไฟฟ้าที่น้อยลง ซึ่งการค้นหาคำตอบในการหาค่าเหมาะสมที่สุด แบบ PSO จะมีการใช้สมการความเร็วในการค้นหาคำตอบดังสมการที่ (67) ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่ส่งผลต่อการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากวิธีการ PSO จากที่กล่าวการจำลองในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาพัฒนามีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบจากรูปแบบที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำถึง 0.03738 kV/m โดยค่าแรงดันของสายส่งจะมีค่าที่ 69 และ 230 kV ซึ่งมุมของแรงดันที่เกิดจากสายส่งที่นำมาพัฒนานั้นมีค่าต่างกันอยู่ที่ 120 องศาทางไฟฟ้า เมื่อทำการจัดเรียงเฟสและให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ดีจะมีรูปแบบที่ถูกนำมาพัฒนาปรับปรุงจะมีความแตกต่างกันดังภาพประกอบ 22 โดยจากการค้นหาคำตอบของสมการที่ให้ค่าที่เหมาะสมดังภาพประกอบ 21 และสามารถคำนวณหาค่าไฟฟ้าในแต่ละจุดโดยหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันกับสมการที่ (68) โดยค่าแรงดันที่จะ

นำมาใช้นั้นจะต้องคิดต่อเฟสแรงดันโดยจะสามารถหาค่าแรงดันที่จะนำไปใช้ในการคำนวณได้ดังสมการที่ (69)



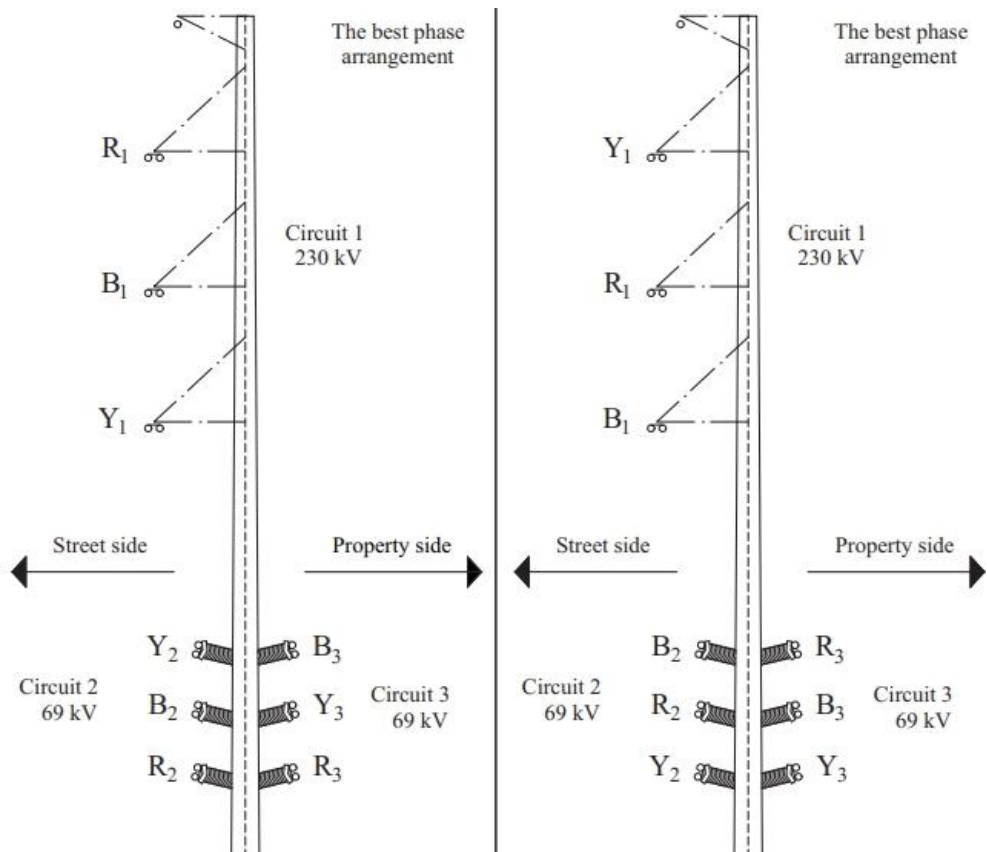
ภาพประกอบ 22 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้า

$$\vec{v}_i(t) = \omega \cdot \vec{v}_i(t-1) + c_1[\vec{p}_{pbest_i}] + c_2[\vec{p}_{gbest_i} - \vec{p}_i(t)] \quad (67)$$

$$\vec{E} = \frac{V \angle \phi_n}{R_n \ln\left(\frac{y_n}{a}\right)} (\cos \theta_n \vec{a}_x + \sin \theta_n \vec{a}_y) \quad (68)$$

$$V_{sim} = \frac{V_{system}}{\sqrt{3}} \quad (69)$$

ซึ่งค่าแรงดันของทั้ง 3 ระบบที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นจะมีค่า เท่ากับ 132.7906 kV 1 ระบบ และ 39.837 kV 2 ระบบ พารามิเตอร์ตัวต่อไปคือ  $a$  ซึ่งพารามิเตอร์นี้ถูกใช้ในค่าเดียวกันคือ 0.01285 m ซึ่งเป็นค่าคงที่ของสายส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง จากนั้นพารามิเตอร์ตัวอื่นสามารถที่จะพิจารณาของระยะของเสาจากจุดพิจารณา



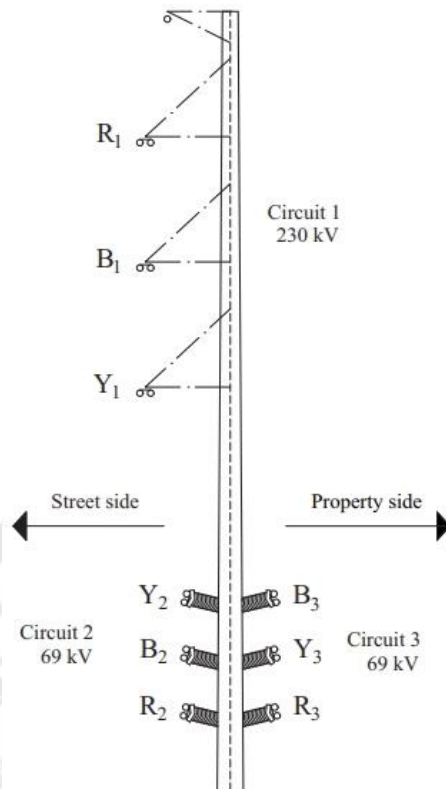
ภาพประกอบ 23 รูปแบบที่นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด สนามไฟฟ้า

ที่มา: Nunchuen et al., 2019

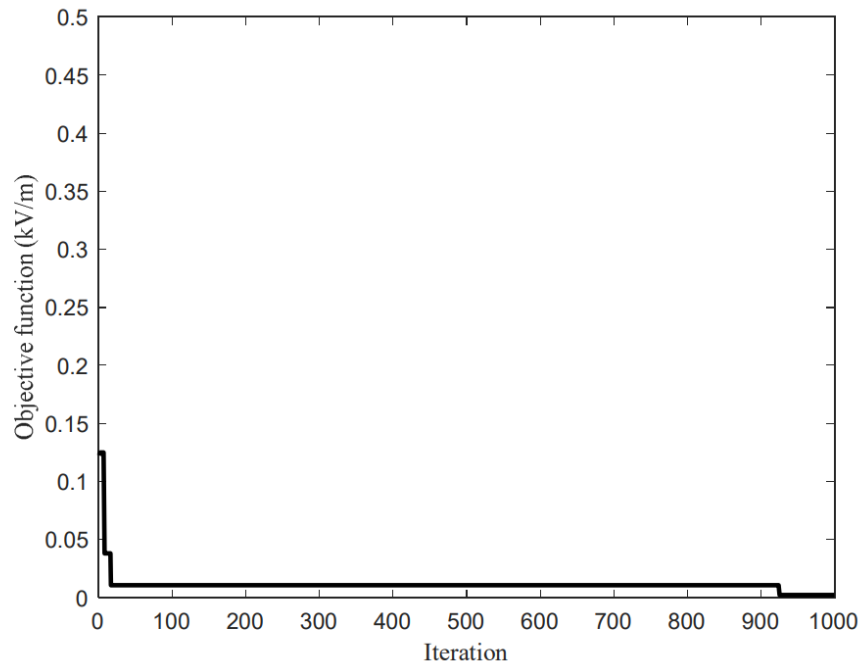
โดยรูปแบบที่ 1 จะมีค่าการจัดเรียงเฟสที่แตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ คือ มีการจัดเรียงวงจรที่รูปแบบที่ 1 คือ RBY (ที่ 230 kV) การจัดเรียงวงจรที่ 2 รูปแบบที่ 2 คือ YBR (ที่ 69 kV) และการจัดเรียงวงจรที่ 3 รูปแบบที่ 3 คือ BYR (ที่ 69 kV) โดยที่เฟส R มีค่าเท่ากับ  $V\angle 0$ , เฟส Y มีค่าเท่ากับ  $V\angle 120$  และ เฟส B มีค่าเท่ากับ  $V\angle -120$  เมื่อ  $V$  แทนค่าแรงดันของแต่ละระบบ

เช่นเดียวกันกับรูปแบบที่ 2 ที่มีการจัดเรียงวงจรที่รูปแบบที่ 1 คือ YRB (ที่ 230 kV) การจัดเรียงวงจรที่ 2 รูปแบบที่ 2 คือ BRV (ที่ 69 kV) และการจัดเรียงวงจรที่ 3 รูปแบบที่ 3 คือ RBY (ที่ 69 kV) โดยค่าแรงดันกับมุมเฟสของแรงดันจะแสดงเช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาในข้างต้น จากนั้นที่ทราบมีการใช้วิธีการ PSO ซึ่งกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในการหาค่าตอบมีตัวแปรที่สำคัญที่นำมาใช้ในการค้นหาคำตอบคือ ค่าของจำนวนอนุภาคไว้ที่ 20 อนุภาค และการวนซ้ำในการหาค่าตอบ คือ 1000 รอบ และยังมีกำหนดตัวแปรที่ช่วยหาค่าเหมาะสมที่สุด ให้มีความเหมาะสมมากที่สุดซึ่งในการหาค่าตอบของวิธีการนั้น มีการกำหนดค่า  $\omega$  ที่ 0.5  $C_1, C_2$  เท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ จากรูปแบบของวิธีการ PSO ตามสมการที่ (67) โดยค่าที่กำหนดมานั้นเป็นค่าที่ส่งผลให้การคำนวณหาค่าที่เหมาะสม

จากการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้วจากการทำการกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการจะนำรูปแบบการจัดเรียงเฟสรูปแบบที่ 1 มาพิจารณาจะมีการจัดเรียงเฟสที่ทำให้ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าอยู่ที่ 0.03738 kV/m คือ ภาพประกอบ 20 เมื่อนำรูปแบบนี้มาพัฒนาและปรับปรุงจะให้ค่าสนามลดลงจนได้ค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดและให้สนามไฟฟ้าลดลงจนมีค่า 0.00238 kV/m จากสมการที่ (68) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำลงดังนี้ วงจรที่ 1 ให้ค่ามุมเฟสที่ 1 คือ 109.443446 องศา, มุมเฟสที่ 2 คือ 229.443446 องศา และมุมเฟสที่ 3 คือ 10.556554 องศา ที่ระบบแรงดัน 230 kV วงจรที่ 2 ให้ค่ามุมเฟสที่ 1 คือ 57.668331 องศา, มุมเฟสที่ 2 คือ 177.668331 องศา และมุมเฟสที่ 3 คือ -62.331669 องศาที่ระบบแรงดัน 69 kV และวงจรที่ 3 ให้ค่ามุมเฟสที่ 1 คือ 1.083263 องศา, มุมเฟสที่ 2 คือ 121.083263 องศา และมุมเฟสที่ 3 คือ -118.916737 องศา ที่ระบบแรงดัน 69 kV โดยวิธีการที่กล่าวมานั้นให้รูปแบบของการค้นหาค่าตอบดังภาพประกอบ 22 จะเห็นได้ค่าคำตอบสามารถเข้าสู่หาค่าที่ต่ำที่สุดของข้อจำกัดที่กำหนดที่การค้นหาคำตอบที่ 1000 รอบจากการกำหนดพารามิเตอร์ข้างต้น ซึ่งการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการ PSO สามารถที่จะค้นหาค่าตอบในเวลาเพียง 0.067740 วินาที ของรูปแบบที่ 1



ภาพประกอบ 24 รูปแบบวงจรที่นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด รูปแบบที่ 1



ภาพประกอบ 25 ผลลัพธ์ในการหาค่าสนามไฟฟ้าจากวิธีการ PSO รูปแบบที่ 1



โดยจะแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่ามีการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสตั้งที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งค่ามุมเฟสของแรงดันที่ได้จากการค้นหาคำตอบนั้นจะมีความละเอียดทางคณิตศาสตร์และสามารถที่จะส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้นเมื่อนำมาปรับปรุงโดยใช้การพิจารณาการจัดเรียงเฟสของแรงดันร่วมกับวิธีการ PSO ที่ช่วยในการค้นหาคำตอบให้ได้ค่าเหมาะสมที่สุดนั้น

แต่จากที่กล่าวมานั้นเป็นเพียง 1 รูปแบบของงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณางานวิจัยทำถึง 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 2 ที่ถูกนำมาพิจารณาเป็นดังภาพประกอบ 23 โดยรูปแบบที่ 2 จะกำหนดตัวแปรที่มีผลกับวิธีการ PSO ดังนี้ กำหนดค่า  $\omega$  ที่ 0.5 และ  $C_1, C_2$  เท่ากับ 2 และ 2.5 ตามลำดับ ที่แตกต่างจากรูปแบบที่ 1 เพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้คำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุด และยังกำหนดค่าของจำนวนอนุภาคไว้ที่ 20 อนุภาค และการวนซ้ำในการหาคำตอบ คือ 1000 รอบในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ของคำตอบเสมือนรูปแบบที่ 1 โดยการค้นหาคำตอบของรูปแบบที่ 2 สามารถให้คำตอบของค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ดีขึ้นเป็น 0.00435 kV/m และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเพียง 0.072546 วินาที และแสดงให้เห็นถึงการค้นหาคำตอบของวิธีการ PSO คล้ายกับรูปแบบที่ 1 แต่แตกต่างกันที่ผลลัพธ์ของคำตอบดังภาพประกอบ 24 โดยให้ค่ามุมเฟสที่ได้จากการวิธีการ PSO ที่ส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด คือ วงจรที่ 1 ให้ค่ามุมเฟสที่ 1 คือ 30.599322 องศา , มุมเฟสที่ 2 คือ 150.599322 องศา และมุมเฟสที่ 3 คือ -89.400678 องศา ที่ระบบแรงดัน 230 kV วงจรที่ 2 ให้ค่ามุมเฟสที่ 1 คือ 175.367646 องศา, มุมเฟสที่ 2 คือ 295.367646 องศา และมุมเฟสที่ 3 คือ 58.367646 องศาที่ระบบแรงดัน 69 kV และวงจรที่ 3 ให้ค่ามุมเฟสที่ 1 คือ 12.063235 องศา มุมเฟสที่ 2 คือ 132.063235 องศา และมุมเฟสที่ 3 คือ -107.936765 องศา องศา ที่ระบบแรงดัน 69 kV

ตาราง 2 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ PSO

	$\omega$	$C_1$	$C_2$
รูปแบบที่ 1	0.5	2	3
รูปแบบที่ 2	0.5	2	2.5

ตาราง 3 ผลลัพธ์จากการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ค่าจากการหาค่าโดยวิธีการ PSO ระบบที่ 1 ที่แรงดัน 230 kV

	มุมเฟสที่ 1	มุมเฟสที่ 2	มุมเฟสที่ 3
รูปแบบที่ 1	109.443446	229.443446	10.556554
รูปแบบที่ 2	30.599322	150.599322	-89.400678

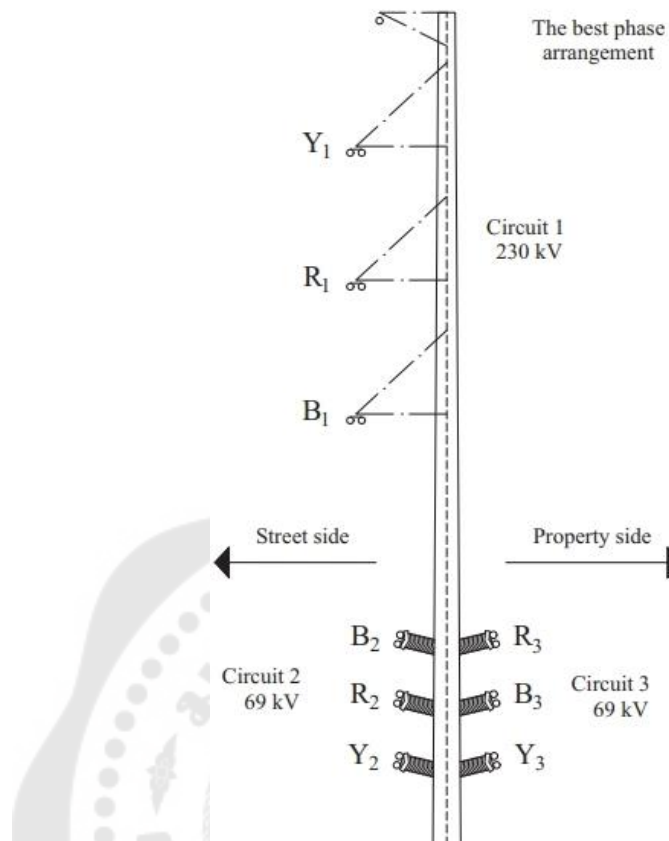
ตาราง 4 ผลลัพธ์จากการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ค่าจากการหาค่าโดยวิธีการ PSO ระบบที่ 2 ที่แรงดัน 69 kV

	มุมเฟสที่ 1	มุมเฟสที่ 2	มุมเฟสที่ 3
รูปแบบที่ 1	57.668331	177.668331	-62.331669
รูปแบบที่ 2	175.367646	295.367646	58.367646

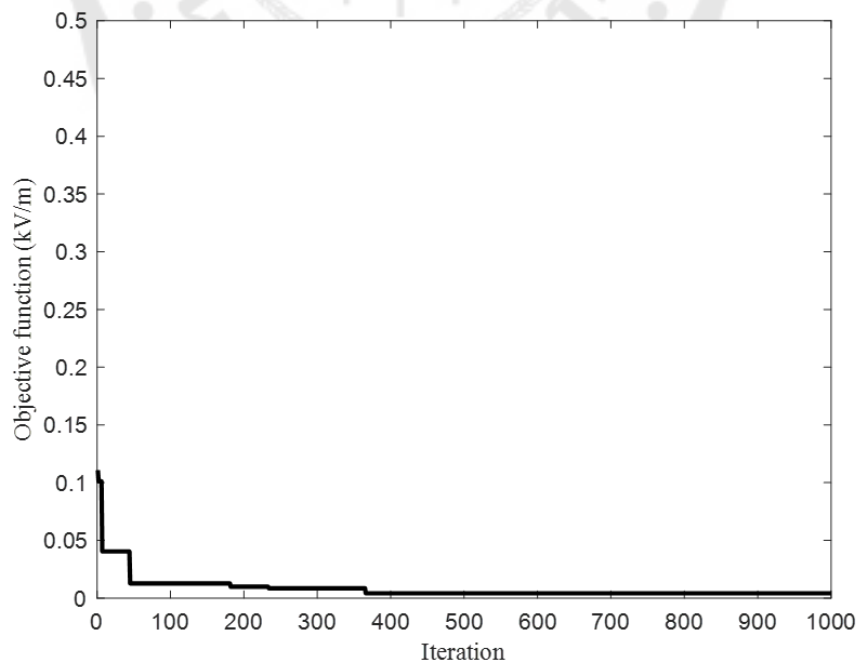
ตาราง 5 ผลลัพธ์จากการหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ค่าจากการหาค่าโดยวิธีการ PSO ระบบที่ 3 ที่แรงดัน 69 kV

	มุมเฟสที่ 1	มุมเฟสที่ 2	มุมเฟสที่ 3
รูปแบบที่ 1	1.083263	121.083263	-118.916737
รูปแบบที่ 2	12.063235	132.063235	-107.936765

โดยทั้ง 2 รูปแบบนั้นวิธีการค้นหาค่าตอบจะเป็นไปในทางเดียวกันเมื่อพิจารณาจากที่ได้กล่าวไปข้างต้น ดังภาพประกอบ 21 และ 23 และผลลัพธ์ของค่าสนามไฟฟ้าที่นำรูปแบบการจัดเรียงเฟสขึ้นมาพัฒนาปรับปรุงนั้น ด้วยวิธีการ PSO ร่วมกับวิธีการปรับมุมเฟสของแรงดัน ซึ่งจะได้เห็นว่าค่าของสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากจะมีการลดค่าสนามไฟฟ้าลงจากรูปแบบที่นำมาพิจารณา โดยการค้นหาค่าตอบและจะให้คำตอบที่มีเหมาะสมที่สุดของการหาค่าตอบ จากที่กล่าวไปข้างต้น และเมื่อได้คำตอบที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้ว วิธีการ PSO นี้ยังใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบไม่มากอีกด้วยตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นอีกด้วย



ภาพประกอบ 26 รูปแบบวงจรที่นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด รูปแบบที่ 2



ภาพประกอบ 27 ผลลัพธ์ในการหาค่าสนามไฟฟ้าจากวิธีการ PSO รูปแบบที่ 2

แต่จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นการปรับปรุงและพัฒนาค่าสนามไฟฟ้าโดยการพิจารณาการปรับมุมเฟสของแรงดันร่วมกับวิธีการ PSO นั้นสามารถให้ค่าสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด แต่ในอีกทางนั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของแรงดันได้เนื่องจากการทำงานเชิงปฏิบัตินั้น อาจเกิดปัญหาหรืออุปสรรคจากการปรับมุมเฟสของแรงดันได้ อาจเพิ่มค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงเป็นอย่างมาก หรือเพิ่มความยุ่งยากซับซ้อนของการปฏิบัติงาน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งอาจเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ก็จะส่งผลให้ตัวแปรที่จะใช้ในการลดสนามไฟฟ้านั้นจะนำการปรับมุมเฟสของแรงดันไปใช้ได้อีกด้วย



## บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน

### สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าเหมาะสมที่สุด ของสนามไฟฟ้าหรือที่สามารถทราบได้จากที่กล่าวมาคือ การลดค่าสนามไฟฟ้าด้วยวิธีการ PSO ร่วมกับการพิจารณามุมเฟสของแรงดัน โดยงานวิจัยนี้ได้นำผลการจำลองการหาค่าสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดในงานวิจัยของ Suthasinee Nunchuen, และ Vuttipon Tarateeraseth (Nunchuen & Tarateeraseth, 2021) ซึ่งได้นำเสนอจากการจัดเรียงเฟสที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่มีค่าคือ 0.03738 kV/m มาทำการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ของค่าสนามไฟฟ้า โดยรูปแบบที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดนั้นมี 2 รูปแบบ โดย 2 รูปแบบนี้จะมีการจัดเรียงเฟสของสายส่งแรงดันที่แตกต่างกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการลดค่าสนามไฟฟ้าลงได้อีกจนได้ค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพิ่มขึ้นซึ่งให้ค่าสนามไฟฟ้าอยู่ที่ 0.00238 kV/m ตามรูปการณจัดเรียงเฟสรูปแบบที่ 1 ดังภาพประกอบ 22 และ 0.00435 kV/m ตามรูปการณจัดเรียงเฟสรูปแบบที่ 1 ดังภาพประกอบ 24 ซึ่งจาก 2 รูปแบบที่นำมาหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการ PSO ร่วมกับการพิจารณามุมเฟสของแรงดัน สามารถที่จะลดค่าของสนามไฟฟ้าจาก 2 รูปแบบได้ถึง และ 0.035 kV/m และ 0.03033 kV/m ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 โดยการค้นหาคำตอบจากการจำลองการออกแบบที่ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด นี้ทำได้โดยการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำลงอย่างมีเหมาะสมที่สุด

ตาราง 6 ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีการ PSO ร่วมกับการพิจารณามุมเฟสของแรงดัน

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2
การจัดเรียงเฟสของสายส่งที่นำมาพิจารณาก่อนปรับปรุง	0.03738 kV/m	0.03738 kV/m
การปรับปรุงโดยวิธีการ PSO ร่วมกับการพิจารณามุมเฟสของแรงดัน	0.00238 kV/m	0.00435 kV/m
ปริมาณสนามไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อนำมาปรับปรุง	0.035 kV/m	0.03033 kV/m

จากผลการจำลองจะทำให้เห็นได้ว่าค่าสนามไฟฟ้าที่นำมาพัฒนาและปรับปรุงให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพิ่มขึ้นด้วยวิธีการ PSO ร่วมกับการพิจารณามุมเฟสของแรงดัน เป็นไปตามหลักมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (WHO) ที่กำหนดค่าไว้ที่ 5 kV/m ตลอดวันในการสัมผัสกับ

สนามไฟฟ้า ดังนั้นการจำลองนี้สามารถช่วยในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ของสนามไฟฟ้าอีกด้วย เพื่อให้สามารถได้รับสนามไฟฟ้าที่ต่ำลงและไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ ซึ่งในอนาคตจะมีการเพิ่มกำลังการใช้ไฟฟ้ามากขึ้นก็จะมีสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกด้วย และเมื่อสนามไฟฟ้ามีมากขึ้นก็จะส่งผลกระทบต่อให้มนุษย์ได้รับสนามไฟฟ้า เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อร่างกาย โดยงานวิจัยนี้จะเป็นทางเลือกที่จะช่วยในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ให้ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำและมีผลกระทบต่อมนุษย์น้อยที่สุดเท่าที่จะได้รับเข้าสู่ร่างกายได้

### ปัญหาและอุปสรรค

1. จากการที่แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง ผู้ทำการทดลองได้คิดค้นการใช้ Code ของ MATLAB ขึ้นเองถึงแม้จะมีการแก้ไขข้อบกพร่องมาตลอด แต่ก็ยังมีผลที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณหนึ่ง จากตัวแปรของวิธีการ PSO
2. ความชำนาญในการใช้โปรแกรม MATLAB อาทิเช่น คำสั่งพิเศษ หรือคำสั่งเฉพาะต่างๆ จึงท ำให้เสียเวลาในการแก้ไขปัญหาค ำให้เกิดความล่าช้าในการทดลอง
3. การนำรูปแบบที่หาค่าเหมาะสมที่สุด มาใช้งานอาจจะมีการเพิ่มต้นทุน หรือซับซ้อนจากรูปแบบในการจำลอง

### ข้อเสนอแนะ

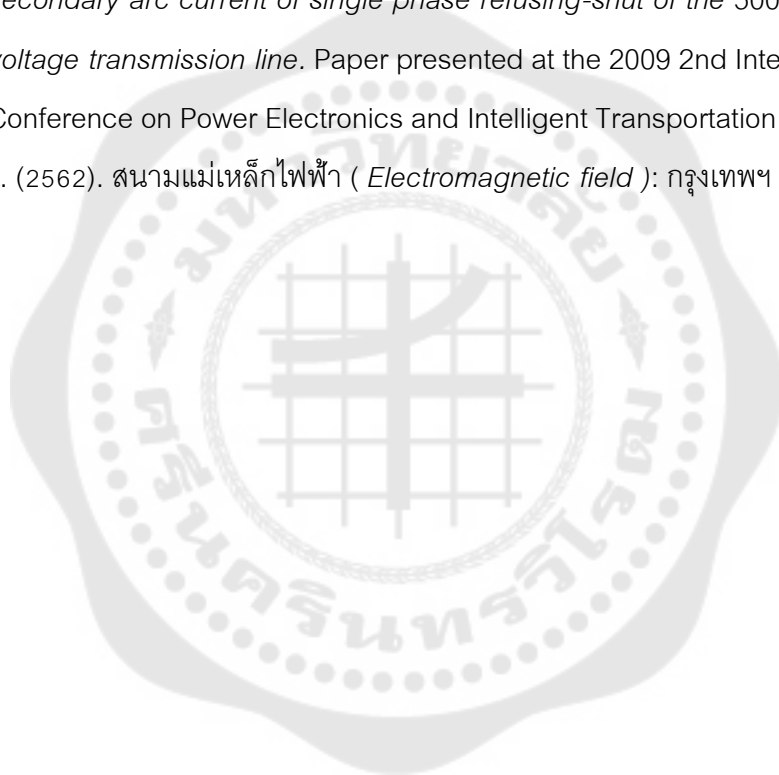
จากการที่ได้ศึกษาทำงานวิจัยนั้น เห็นถึงปัญหาและการนำมาใช้งานอย่างแท้จริงของการจำลอง ดังนี้

1. ในการรันโปรแกรม MATLAB ควรศึกษาโปรแกรมคำสั่งต่างๆให้เกิดความเข้าใจ เพื่อ ง่ายต่อการปฏิบัติงานในการหาค่าตอบ
2. ควรพิจารณาตัวแปรที่สามารถหาค่าเหมาะสมที่สุด และนำมาใช้งานในการพิจารณาที่ สามารถทำงานได้ และไม่ซับซ้อนในการนำไปใช้งานเพื่อลดค่าสนามไฟฟ้าจริงในปัจจุบัน อาทิเช่น สามารถลดต้นทุน ลดตัวแปรที่พิจารณา เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- Association, I. R. P. (1984). Extremely low frequency (ELF) fields.
- Das, H., Gogoi, K., & Chatterjee, S. (2015, 10-11 Jan. 2015). *Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans*. Paper presented at the 2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN).
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. Paper presented at the Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks.
- Krol, K., & Machczynski, W. (2018). Optimization of electric and magnetic field intensities in proximity of power lines using genetic and particle swarm algorithms. *Archives of Electrical Engineering*, 829–843-829–843.
- Mikki, S. M., & Kishk, A. A. (2006). Quantum particle swarm optimization for electromagnetics. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 54(10), 2764-2775.
- Min, L., Yu-xin, Y., Long-cheng, L., Xin-zhen, F., & Qing-quan, L. (2011, 6-9 July 2011). *Total electric field for the parallel power transmission line on the same tower*. Paper presented at the 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT).
- Nunchuen, S., & Tarateeraseth, V. (2021). Electric and Magnetic Field Minimization using Optimal Phase Arrangement Techniques for MEA Overhead Power Transmission Lines. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 19(1), 51-58.
- Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33-57.
- Qingyu, W., Zongren, P., Xi, Y., Naiyi, L., Jialong, W., & Jintao, L. (2014, 19-22 Oct. 2014). *Electric field computation and optimization of composite tower in 330 kV double circuit transmission lines*. Paper presented at the 2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP).

- Rankovic, A., Mijailovic, V., Rozgic, D., & Cetenovic, D. (2017). Optimization of electric and magnetic field emissions produced by independent parallel overhead power lines. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 14(2), 199-216.
- Shi, Y. (2001). *Particle swarm optimization: developments, applications and resources*. Paper presented at the Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546).
- Yang, H., Wu, D., Gu, Y., & Bi, Z. (2009, 19-20 Dec. 2009). *Analysis on fault voltage and secondary arc current of single phase refusing-shut of the 500kV extra high voltage transmission line*. Paper presented at the 2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS).
- วุฒิพล, ธ. (2562). สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ( *Electromagnetic field* ): กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.







## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิริรัศมี สีมภาพงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	2 พฤษภาคม 2541
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสระบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2562 วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	16/1 หมู่13 ตำบลหัวไผ่ อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี 16000

