

การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร้ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง



นายวรรณธนะ กสานติกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

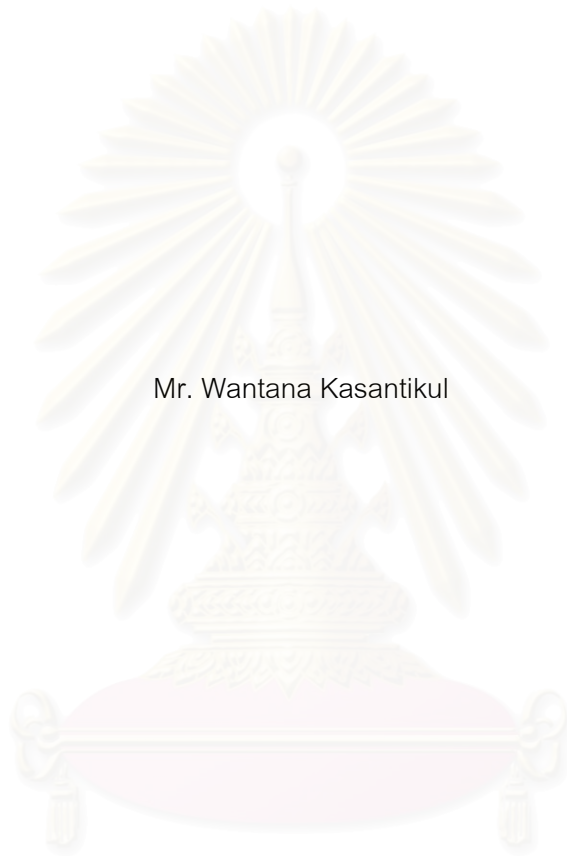
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1501-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CROP GROWTH MONITORING USING POLARIMETRY OF THE SCATTERED WAVES



Mr. Wantana Kasantikul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1501-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง
โดย	นายวรรณณะ กสานติกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วรรณธนะ กษานติกุล : การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง (CROP GROWTH MONITORING USING POLARIMETRY OF THE SCATTERED WAVES) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.ฉัตรชัย ไวยภาพัฒนกร, 134 หน้า.

ISBN 974-03-1501-1

การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่เพื่อทราบสถานะของพืชไร่ที่เวลาใดๆ มีความสำคัญและจำเป็นต่อการจัดการกับผลผลิตที่จะเกิดขึ้น การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ทำให้ทราบว่าผลผลิตออกสู่ตลาดเมื่อใด ปริมาณเท่าใด และจากที่ใด งานวิจัยนี้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง แล้วจำแนกป่าที่เป็นพืชไร่ชนิดเดียวกันแต่ต่างกันทางสถานะการเจริญเติบโต งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงเพื่อวัดเก็บข้อมูลจากพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่าง ๆ กัน 7 ครั้ง ตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงระยะเก็บเกี่ยวและวิเคราะห์เพื่อหาวิธีแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่

ระบบวัดที่สร้างขึ้นเป็นระบบวัดเสมือนเอกสถิตบนภาคพื้นดินย่านความถี่ C โดยสามารถปรับสายอากาศรับและส่งได้ 4 กรณีสอง (HH HV VH และ VV) ระบบวัดนี้ใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ 3 ชนิด ที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ได้แก่ ถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวาน จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่าง ๆ กัน 4 ดัชนีคือ 1. ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบเมทริกซ์การกระเจิงสององค์ประกอบร่วมกัน 2. ระดับชั้นโพลาไรเซชัน 3. ตำแหน่งสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเร และ 4. อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาไรเซชัน แต่ละดัชนีมีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ไม่เท่ากัน ตำแหน่งสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรเป็นดัชนีที่สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ดีที่สุดทั้งจากการพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดและการพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา..วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา..2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4170499221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: CROP GROWTH MONITORING/POLARIMETRY OF SCATTERED WAVES

WANTANA KASANTIKUL : CROP GROWTH MONITORING USING

POLARIMETRY OF THE SCATTERED WAVES. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.

CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, Ph. D. 134pp. ISBN 974-03-1501-1

Crop growth monitoring, the process conducted to observe the growth state of the crop, is a significant and necessary procedure for crop production management. Crop growth monitoring enables us to pre-plan the date for market launch of the produce, in terms of both quantity and source of origin. This research monitors crop growth by using polarimetry of the scattered waves. It categorizes the crops of the same species with different growth states. This research also develops a polarimetric measurement system in order to monitor the growth state. Measurements are performed to collect data of 7 different crop growth states, from the beginning of seeding to the harvest period of the crop.

The measurement system developed is a ground based quasi-monostatic unit operating in the C band. It is capable of measuring 4 combinations of polarization states (HH HV VH VV). The system is used to monitor three different types of crops: groundnut, sunflower and sweetcorn. Four indices are employed in identifying growth states; 1) mean values of two components of the scattering parameters; 2) degree of polarization; 3) position of the polarization state on the Poincare sphere; and 4) the polarization discrimination ratio. Of these four indices, the position of the state of polarization on the Poincare sphere has proven to be the most accurate and reliable approach for identifying the growth states of each individual species and classifying the three species from one another.

Department..Electrical Engineering..... Student's signature.....

Field of study..Electrical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year..2001..... Co-advisor signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยภาพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ทั้งที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และที่นอกเหนือจากงานวิจัยก็ได้รับความเมตตาเสมอมา ตั้งแต่ก่อนเข้าศึกษาในระดับปริญญาโทมาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์วีระ กสานติกุล และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของวิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพืชไร่ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในทุกด้านขณะทำงานวิจัยในภาคสนามที่แปลงทดลองพืชไร่ของวิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี

ขอขอบคุณนิสิตห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนการศึกษา และงบประมาณในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบิดา มารดา และน้องของผู้วิจัยทั้ง 3 คน ที่มีส่วนสนับสนุนงานวิจัยเสมอมาทั้งทางตรงและทางอ้อม ขอขอบคุณพี่สาวคนเดียวของผู้วิจัย ที่ได้ทำหน้าที่แทนผู้วิจัยในช่วงสุดท้าย เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยได้อย่างเต็มที่ และขอขอบคุณ คุณรุ่งรัตน์ ชมเชย ที่เป็นทั้งผู้ช่วยและเป็นกำลังใจจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยตระหนักดีว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลงได้เลย หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลทั้งที่ได้กล่าวถึงในข้างต้นและอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
เค้าโครงวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	6
ปรากฏการณ์คลื่นเมื่อตกกระทบวัตถุ.....	6
การกระเจิงของคลื่นจากเป้า.....	7
สถานะโพลาริเซชัน.....	12
พารามิเตอร์พื้นฐานที่แสดงสมบัติของเป้าจากการวัดโพลาริเซชัน ของคลื่นกระเจิง.....	15
เมทริกซ์การกระเจิง.....	15
สโตกส์เวกเตอร์และระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	16
ยูนิตสโตกส์พารามิเตอร์และอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....	19
บทที่ 3 ระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงและรายละเอียดการทดลอง.....	20
แนวคิดในการออกแบบระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	20
ปัจจัยในการออกแบบตามหลักการของระบบวัด.....	20
ปัจจัยในการออกแบบเกี่ยวกับระบบวัดทางกายภาพ.....	23
โครงสร้างของระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	24
เครื่องมือวัดและบันทึกผล.....	25



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เสาจับสายอากาศและอุปกรณ์เสริมอื่นๆ.....	28
พีซีไรต์ที่ติดตามการเจริญเติบโตในวิทยานิพนธ์นี้.....	32
ถั่วลิสง.....	33
ทานตะวัน.....	34
ข้าวโพดหวาน.....	35
รายละเอียดการทดลองและการวัดเก็บข้อมูล.....	36
แปลงทดลอง การปลูก และการดูแลรักษาแปลงทดลอง.....	37
แผนการวัดเก็บข้อมูล.....	39
ขั้นตอนในการวัดเก็บข้อมูล.....	41
ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในการวัดเก็บข้อมูล.....	42
บทที่ 4 ผลการวัดเก็บข้อมูล.....	43
ผลการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	43
การปรับเทียบก่อนวัดเก็บข้อมูล.....	43
ค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิง.....	45
ผลการติดตามการเจริญเติบโตของพีซีไรท์ทางพฤกษศาสตร์.....	54
ถั่วลิสง.....	55
ทานตะวัน.....	58
ข้าวโพดหวาน.....	62
บทที่ 5 สารสนเทศเกี่ยวกับสถานะการเจริญเติบโตของพีซีไรท์ที่ได้จาก โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	66
ดัชนีที่คำนวณได้จากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงเพื่อใช้ ติดตามการเจริญเติบโตของพีซีไรท์.....	66
ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบเมทริกซ์การกระเจิง สององค์ประกอบร่วมกัน.....	67
ระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	78
ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร.....	83



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....	91
การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่างๆ ที่คำนวณจาก โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง.....	96
การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน.....	97
การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	104
การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยตำแหน่งสถานะ โพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....	111
การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยอัตราส่วนการ แบ่งแยกโพลาริเซชัน.....	118
ความสัมพันธ์ของสถานะการเจริญเติบโตที่แยกด้วยดัชนีที่คำนวณได้จาก โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงกับลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืชไร่.....	125
สรุปการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง....	127
บทที่ 6 บทสรุป.....	129
สรุปผลการวิจัย.....	129
ข้อสังเกตและข้อเสนอแนะ.....	130
รายการอ้างอิง.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	134

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน.....	98
ตารางที่ 5.2 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน.....	100
ตารางที่ 5.3 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน.....	101
ตารางที่ 5.4 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไร่ทั้ง 3 ชนิดด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน.....	103
ตารางที่ 5.5 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	105
ตารางที่ 5.6 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	106
ตารางที่ 5.7 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	108
ตารางที่ 5.8 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไร่ทั้ง 3 ชนิดด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน....	110
ตารางที่ 5.9 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยตำแหน่ง สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....	112
ตารางที่ 5.10 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันด้วยตำแหน่ง สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....	113
ตารางที่ 5.11 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วยตำแหน่ง สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....	115
ตารางที่ 5.12 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไร่ทั้ง 3 ชนิดด้วยตำแหน่ง สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....	117
ตารางที่ 5.13 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยอัตราส่วน การแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....	119
ตารางที่ 5.14 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันด้วยอัตราส่วน การแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....	120
ตารางที่ 5.15 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วยอัตราส่วน การแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....	122
ตารางที่ 5.16 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไร่ทั้ง 3 ชนิดด้วยอัตราส่วน การแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....	124

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 6.1 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่างๆ.....130



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่เมื่อตกกระทบวัตถุ.....	7
รูปที่ 2.2 ระบบการกระเจิงของเป้า.....	8
รูปที่ 2.3 เป้าแบบจุดชนิดต่างๆ.....	9
รูปที่ 2.4 การกระเจิงจากพื้นผิวต่างๆ ของเป้ากระจาย.....	9
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นต่อความยาวคลื่น กับความเข้มของ พลังงานจากคลื่นกระเจิงและคลื่นสะท้อน.....	10
รูปที่ 2.6 การกระเจิงบนพื้นผิวและการกระเจิงเชิงปริมาตร.....	10
รูปที่ 2.7 วงรีโพลาไรเซชัน.....	13
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเร.....	14
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของวงรีโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเร.....	15
รูปที่ 3.1 โครงสร้างอย่างง่ายของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	24
รูปที่ 3.2 ระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	26
รูปที่ 3.3 สายอากาศส่งและรับในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	27
รูปที่ 3.4 การวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับทั้ง 4 กรณี.....	27
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดและบันทึกผลของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง.....	28
รูปที่ 3.6 ฐานของเสาจับสายอากาศ.....	29
รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของเสาจับสายอากาศ.....	30
รูปที่ 3.8 เสาจับสายอากาศ.....	31
รูปที่ 3.9 แปลงทดลง.....	37
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ใช้วัดเก็บข้อมูลในแปลงทดลง.....	40
รูปที่ 3.11 ระบบวัดโพลาไรเซชันขณะวัดเก็บข้อมูล.....	41
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบ $S_{nh}$ ของถั่วลิสง.....	47
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบ $S_{nv}$ ของถั่วลิสง.....	48
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบ $S_{vh}$ ของถั่วลิสง.....	48
รูปที่ 4.4 องค์ประกอบ $S_{vv}$ ของถั่วลิสง.....	49
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบ $S_{nh}$ ของทานตะวัน.....	49
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบ $S_{nv}$ ของทานตะวัน.....	50
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบ $S_{vh}$ ของทานตะวัน.....	50
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบ $S_{vv}$ ของทานตะวัน.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 องค์ประกอบ  $S_{nh}$  ของข้าวโพดหวาน.....51

รูปที่ 4.10 องค์ประกอบ  $S_{nv}$  ของข้าวโพดหวาน.....52

รูปที่ 4.11 องค์ประกอบ  $S_{vh}$  ของข้าวโพดหวาน.....52

รูปที่ 4.12 องค์ประกอบ  $S_{vv}$  ของข้าวโพดหวาน.....53

รูปที่ 4.13 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการวัดครั้งที่ 1.....55

รูปที่ 4.14 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการวัดครั้งที่ 2.....55

รูปที่ 4.15 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการวัดครั้งที่ 3.....56

รูปที่ 4.16 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการวัดครั้งที่ 4.....56

รูปที่ 4.17 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการวัดครั้งที่ 5.....57

รูปที่ 4.18 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการวัดครั้งที่ 6.....57

รูปที่ 4.19 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการวัดครั้งที่ 7.....58

รูปที่ 4.20 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันจากการวัดครั้งที่ 1.....58

รูปที่ 4.21 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันจากการวัดครั้งที่ 2.....59

รูปที่ 4.22 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันจากการวัดครั้งที่ 3.....59

รูปที่ 4.23 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันจากการวัดครั้งที่ 4.....60

รูปที่ 4.24 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันจากการวัดครั้งที่ 5.....60

รูปที่ 4.25 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันจากการวัดครั้งที่ 6.....61

รูปที่ 4.26 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันจากการวัดครั้งที่ 7.....61

รูปที่ 4.27 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานจากการวัดครั้งที่ 1.....62

รูปที่ 4.28 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานจากการวัดครั้งที่ 2.....62

รูปที่ 4.29 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานจากการวัดครั้งที่ 3.....63

รูปที่ 4.30 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานจากการวัดครั้งที่ 4.....63

รูปที่ 4.31 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานจากการวัดครั้งที่ 5.....64

รูปที่ 4.32 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานจากการวัดครั้งที่ 6.....64

รูปที่ 4.33 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานจากการวัดครั้งที่ 7.....65

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของถั่วลิสง.....68

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของทานตะวัน.....71

รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของข้าวโพดหวาน.....72

รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด.....75

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.5 ระดับชั้นโพลาริเซชันของถั่วลิสง.....	80
รูปที่ 5.6 ระดับชั้นโพลาริเซชันของทานตะวัน.....	80
รูปที่ 5.7 ระดับชั้นโพลาริเซชันของข้าวโพดหวาน.....	81
รูปที่ 5.8 ระดับชั้นโพลาริเซชันของพีชไร้ทั้ง 3 ชนิด.....	82
รูปที่ 5.9 ตำแหน่งของสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของถั่วลิสง.....	84
รูปที่ 5.10 ตำแหน่งของสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของทานตะวัน.....	85
รูปที่ 5.11 ตำแหน่งของสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของข้าวโพดหวาน.....	86
รูปที่ 5.12 ตำแหน่งของสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของพีชไร้ทั้ง 3 ชนิด.....	87
รูปที่ 5.13 ตำแหน่งของสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของพีชไร้ทั้ง 3 ชนิด.....	89
รูปที่ 5.14 อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันของถั่วลิสง.....	93
รูปที่ 5.15 อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันของทานตะวัน.....	93
รูปที่ 5.16 อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันของข้าวโพดหวาน.....	94
รูปที่ 5.17 อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันของพีชไร้ทั้ง 3 ชนิด.....	95
รูปที่ 5.18 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง เมื่อพิจารณาด้วย ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ $S_{nh}$ และ $S_w$ ร่วมกัน.....	98
รูปที่ 5.19 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวัน เมื่อพิจารณาด้วย ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ $S_{nh}$ และ $S_w$ ร่วมกัน.....	99
รูปที่ 5.20 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน เมื่อพิจารณาด้วย ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ $S_{nh}$ และ $S_w$ ร่วมกัน.....	101
รูปที่ 5.21 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของพีชไร้ทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาด้วย ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ $S_{nh}$ และ $S_w$ ร่วมกัน.....	102
รูปที่ 5.22 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง เมื่อพิจารณาด้วย ระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	104
รูปที่ 5.23 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวัน เมื่อพิจารณาด้วย ระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	106
รูปที่ 5.24 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน เมื่อพิจารณาด้วย ระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	107
รูปที่ 5.25 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของพีชไร้ทั้ง 3 ชนิด เมื่อวิเคราะห์ด้วย ระดับชั้นโพลาริเซชัน.....	109



สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.26 ขอบเขตของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง เมื่อพิจารณาด้วยตำแหน่ง  
สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....112

รูปที่ 5.27 ขอบเขตของสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวัน เมื่อพิจารณาด้วยตำแหน่ง  
สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....113

รูปที่ 5.28 ขอบเขตของสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน เมื่อพิจารณาด้วยตำแหน่ง  
สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....114

รูปที่ 5.29 ขอบเขตของสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาด้วยตำแหน่ง  
สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร.....116

รูปที่ 5.30 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง เมื่อพิจารณาด้วย  
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....118

รูปที่ 5.31 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวัน เมื่อพิจารณาด้วย  
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....120

รูปที่ 5.32 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน เมื่อพิจารณาด้วย  
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....121

รูปที่ 5.33 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาด้วย  
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน.....123



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบวัดเพื่อใช้ในการสำรวจและแยกประเภทป่าในระยะไกลด้วยไมโครเวฟมีอยู่มากมาย และสามารถแบ่งกลุ่มตามระดับความสูงได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ระบบวัดบนพื้นดิน ระบบวัดบนเครื่องบิน และระบบวัดบนดาวเทียม การวัดในแต่ละระบบให้ข้อมูลที่แตกต่างกันจากมุมมองที่ต่างกัน มีข้อดีและข้อด้อยต่างกัน ดังนั้นในบางครั้งจึงต้องอาศัยข้อมูลจากการสำรวจมากกว่าหนึ่งระบบร่วมกันเพื่อแยกประเภทป่า

การศึกษาระบบวัดบนพื้นดินจะให้ข้อมูลที่ต้องการชัดเจนและมีความละเอียดกว่าระบบอื่น เป็นระบบที่ออกแบบง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ของระบบได้ อีกทั้งยังเหมาะกับการศึกษาเพื่อทดสอบสมมติฐาน หรือแนวทางใหม่เพื่อใช้ในการสำรวจ ก่อนพัฒนาเป็นระบบวัดบนเครื่องบิน หรือบนดาวเทียมต่อไป

การวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง เป็นกรรมวิธีการวัดแบบหนึ่งของกรรมวิธีโทรสัมผัส (remote sensing) ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เป็นกรรมวิธีการวัดเพื่อให้ได้ข้อมูลของป่าในระยะไกล ด้วยการวัดคลื่นที่กระเจิงกลับจากป่าเมื่อส่งคลื่นไปตกกระทบ โดยคลื่นที่ส่งมีองค์ประกอบเดียวและมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นไปตกกระทบป่าในแนวโพลาไรเซชันที่ละแนว สมบัติการกระเจิงของป่าจะทำให้คลื่นกระเจิงมีองค์ประกอบครบทั้ง 2 แนวโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกัน ดังนั้นการวัดคลื่นกระเจิงเพื่อให้ได้ข้อมูลครบจะต้องปรับเปลี่ยนแนวสายอากาศรับและส่งเป็น 4 กรณี (HH, HV, VH และ VV) ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ป่าทั้งขนาดและภูมิภาคของคลื่นกระเจิง และการเปลี่ยนโพลาไรเซชันมีมากกว่าการวัดแบบเดิมซึ่งใช้การรับและการส่งคลื่นในแนวโพลาไรเซชันที่เหมือนกันถึง 4 เท่าจากป่าเดียวกัน ข้อมูลที่วัดได้จากป่าจะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลกับสมบัติบางอย่างของป่า และสมบัติของป่า นั้นจะสามารถใช้เป็นเครื่องมือหรือดัชนีในการแยกประเภทและสถานะต่างๆ ของป่าได้ [1, 2]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาทางด้านการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงเพื่อแยกประเภทของป่า พบว่างานวิจัยเหล่านี้จะมุ่งเน้นไปที่การจำแนกป่าที่ต่างชนิดกันและใช้วิธี

วิเคราะห์ที่ไม่เหมือนกัน เช่น M. C. Dobson L. E. Pience และ F. T. Ulaby [3] ศึกษาการแยกประเภทพื้นดิน ต้นไม้ขนาดเล็ก และต้นไม้ขนาดใหญ่ ด้วยการให้สัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของความถี่สองความถี่ร่วมกันในการวิเคราะห์ข้อมูลจากระบบวัด ERS-1 ร่วมกับ JERS-1 S. H. Yuch และคณะ [4] จำแนกน้ำทะเลและภูเขา น้ำแข็งซึ่งมีสถานะต่างกันได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ตั้งฉากกันสององค์ประกอบของคลื่นกระเจิงกลับ S. C. Liew และคณะ [5] ได้จำแนกพืชที่บริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำโขงออกเป็น 8 ประเภทตามลักษณะพื้นผิวและพืชคลุมดิน โดยใช้ข้อมูลจาก ERS ร่วมกับ RADARSAT SAR ในแนวโพลาริเซชันที่ต่างกัน โดยละเอียดผลที่เกิดจากการเก็บข้อมูลจากทั้งสองระบบซึ่งกระทำต่างกัน 5 วัน แต่ให้ข้อสังเกตไว้ด้วยว่า เมื่อเวลาผ่านไปข้อมูลของป่าที่ได้รับควรจะต่างกันเพราะสถานะการเจริญเติบโตของต้นข้าวบริเวณที่ทำการสำรวจต่างไป I. H. Woodhouse และ D. H. Hoekman [6] ได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองตัวกระเจิงคลื่นของการเจริญเติบโตของต้นสนชนิดหนึ่งด้วยข้อมูลทางสถิติขององค์ประกอบส่วนที่กระเจิงคลื่น โดยใช้ข้อมูลจากการวัดโพลาริเซชันคลื่นกระเจิงย่านความถี่ C จากเครื่องบิน (EMISAR) ต้นสนที่ใช้เป็นป่าเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ ที่มีอายุต่างๆ กัน ลักษณะทางกายภาพของป่าต่างกันค่อนข้างชัดเจน ทั้งความสูง ลักษณะของกิ่งและลำต้น ซึ่งได้ผลที่น่าสนใจเกี่ยวกับการศึกษาโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงจากป่าชนิดเดียวกันแต่ต่างสถานะกัน พีระพงษ์ อุฑารสกุล [7] ศึกษาการแยกประเภทพืชไร่ 7 ชนิดด้วยระบบวัดบนพื้นดิน โดยพิจารณาจากการเก็บข้อมูลจากพืชไร่แต่ละชนิดเพียงครั้งเดียวด้วยวิธีวิเคราะห์ข้อมูลแบบต่างๆ ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง และได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่าหากพืชไร่มีสถานะการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนไปก็ควรที่จะทำให้สมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงเปลี่ยนไปด้วย ในงานวิจัยนั้นได้เสนอระยะห่างระหว่างกลุ่มข้าวเหมือนและกลุ่มข้าวต่าง (Cxgap) เป็นดัชนีใหม่เพื่อใช้แยกประเภทของป่า และพบว่าสามารถใช้แยกประเภทพืชไร่ได้เป็นอย่างดี แต่ดัชนีดังกล่าวไม่สามารถอธิบายสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นให้เป็นที่ยอมรับได้ จึงทำให้นิยามดังกล่าวน่าสนใจน้อยลง

การติดตามการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะพืชไร่เพื่อทราบสถานะของพืชที่เวลาใดๆ นั้นว่ามีความจำเป็น และมีความสำคัญต่อการจัดการกับผลผลิตที่จะเกิดขึ้น ทำให้เราทราบว่าจะมีผลผลิตที่ต้องเก็บเกี่ยว หรือออกสู่ตลาดเมื่อใด ปริมาณเท่าใด และจากพื้นที่ใด อีกทั้งยังเป็นการเฝ้าระวัง และแจ้งข้อมูลให้ทราบอย่างทัน่วงทีในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติ เช่น เกิดโรคพืชหรือแมลงศัตรูพืชระบาด ซึ่งบางชนิดสามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว สร้างความเสียหายแก่เกษตรกรและประเทศชาติเป็นอันมาก ปัจจุบันถ้าต้องการทราบข้อมูลดังกล่าว จะทำได้โดยการส่งเจ้าหน้าที่ออกไปสำรวจจากเกษตรกรทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ซึ่งต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายมาก และบางครั้งยังเกิดปัญหาได้รับข้อมูลไม่ถูกต้อง หรือกว่าจะได้ข้อมูลที่ต้องการก็อาจสายเกินกว่าที่

จะวางแผนหรือแก้ไข วิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ก็คือการประยุกต์ใช้กรรมวิธีโทรสัมผัสกับการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้น และทันกับความต้องการของผู้ใช้

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงด้วยระบบวัดบนพื้นดิน แล้วจำแนกเป้าที่เป็นชนิดเดียวกันแต่สถานะการเจริญเติบโตต่างกันตั้งแต่เริ่มปลูกจนครบวงจรชีวิตซึ่งใช้เวลาไม่นานมาก และพืชไร่เป็นพืชที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเร็วเมื่อเทียบกับพืชไม้ยืนต้น พืชไร่ที่ใช้เป็นเป้าได้แก่ ถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวาน เนื่องจากพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์และการเจริญเติบโตที่ต่างกันอย่างชัดเจน ถั่วลิสงเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ ใบมีขนาดเล็กจำนวนมาก ลำต้นมีลักษณะเป็นทรงพุ่มคลุมดิน มีความสูงเมื่อโตเต็มที่ประมาณ 50-60 เซนติเมตร และความสูงเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ทานตะวันเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีลำต้นตั้งตรง มีใบขนาดใหญ่ ปลายใบและขอบใบเป็นรอยหยัก มีดอกขนาดใหญ่ที่ปลายต้น มีลักษณะการเจริญเติบโตทางความสูงของลำต้นเป็นกราฟรูปเอสและเมื่อโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 150-180 เซนติเมตร ข้าวโพดหวานเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในตระกูลหญ้า ใบประกอบด้วยกาบใบหุ้มลำต้น และแผ่นใบที่แผ่กางออกมีลักษณะเรียวยาว ลักษณะการเจริญเติบโตทางความสูงและความสูงเมื่อโตเต็มที่ใกล้เคียงกับทานตะวัน พืชไร่ทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศทางการเกษตรของประเทศในอนาคตต่อไป

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยดังต่อไปนี้

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง
2. เพื่อพิจารณาสมบัติโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงกลับจากพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ
3. เพื่อติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง

## ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง
2. ออกแบบและสร้างระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง
3. ดำเนินการวัดและติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ ณ วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี
4. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากกรรมวิธีการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงของพืชไร่

## วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเชิงทฤษฎี ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ 3 ส่วน คือ
  - 1.1 การประยุกต์ใช้การวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่
  - 1.2 ศึกษาแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง
  - 1.3 ศึกษาลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ระยะเวลาในการเจริญเติบโต วงจรชีวิตของพืชไร่ และอื่นๆ ที่จำเป็นแก่การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ และดัชนีบ่งชี้การเจริญเติบโตของพืชไร่ที่ใช้ในทางพฤกษศาสตร์ เพื่อใช้ในการวางแผนการดำเนินงานวิจัยในขั้นต่อไป
2. ออกแบบและสร้างระบบวัด เพื่อให้สามารถนำไปใช้เก็บรวบรวมข้อมูลจากแปลงปลูกพืชไร่ได้อย่างเหมาะสม
3. ดำเนินการวัดและเก็บรวบรวมข้อมูล ณ วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี
4. วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง
5. เสนอหลักการหรือดัชนีเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่
6. สรุปผลการวิจัย

## ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. องค์ความรู้ที่เป็นแนวทางในการพัฒนากรรมวิธีติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง
2. ความสามารถในการพัฒนาและสร้างระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงสำหรับติดตามการเจริญเติบโตและแยกประเภทพืชไร่

### เค้าโครงวิทยานิพนธ์

เค้าโครงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้แสดงลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงที่พัฒนาขึ้นและรายละเอียดของการทดลอง บทที่ 4 แสดงผลการวัดและข้อมูลทั้งหมดเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ซึ่งประกอบด้วย ผลการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง และข้อมูลทางด้านพฤกษศาสตร์ของพืชไร่ตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว บทที่ 5 กล่าวถึงการพิจารณาดัชนีต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากผลการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง และเสนอดัชนีเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ และบทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัยต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงกับสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่

การวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง คือการวัดคลื่นกระเจิงกลับจากเป้าในแนวโพลาริเซชันทั้ง 2 แนวซึ่งตั้งฉากกัน ด้วยการปรับสายอากาศรับและส่งให้อยู่ในแนวเดียวกันและตั้งฉากกันรวม 4 กรณี (HH HV VH และ VV) การวิเคราะห์ข้อมูลจากระบบวัดสามารถทำได้หลายแนวทางโดยพิจารณาจากคุณสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงที่วัดได้ บทนี้กล่าวถึงปรากฏการณ์เมื่อคลื่นตกกระทบบั้ววัตถุ การกระเจิงของคลื่นจากเป้า สถานะโพลาริเซชัน และพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้แสดงลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

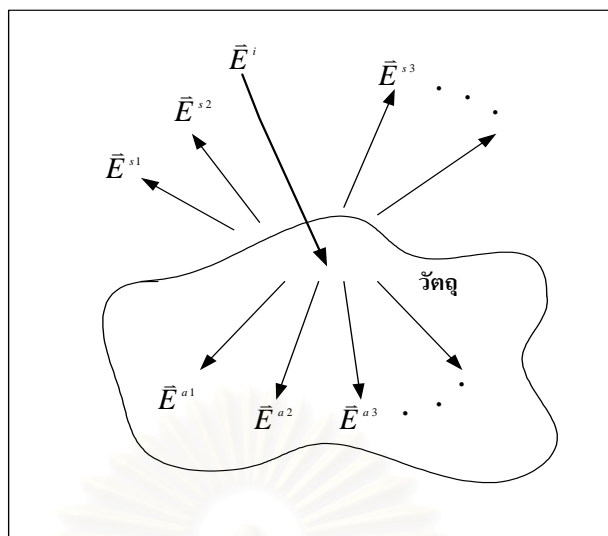
#### ปรากฏการณ์เมื่อคลื่นตกกระทบบั้ววัตถุ

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบั้ววัตถุใดๆ มันจะมีพฤติกรรมตามสมบัติความเป็นคลื่น คือ จะมีคลื่นส่วนหนึ่งถูกดูดกลืนหรือแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อวัตถุ และอีกส่วนหนึ่งเกิดการกระเจิงออกไปจากวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ขนาดและทิศทางของคลื่นกระเจิงขึ้นกับสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุและคลื่นตกกระทบ สมมติว่ามีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบั้ววัตถุ ทำให้เกิดคลื่นที่ถูกดูดกลืนในทิศทางต่างๆ และคลื่นที่กระเจิงออกจากวัตถุในทิศทางต่างๆ ดังนั้นคลื่นตกกระทบจึงมีค่าเท่ากับผลรวมทั้งหมดของคลื่นที่ถูกดูดกลืน และคลื่นที่กระเจิงจากวัตถุจากทุกทิศทาง ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$E^t = E^{a1} + E^{a2} + E^{a3} + \dots + E^{r1} + E^{r2} + E^{r3} + \dots \quad (2.1)$$

โดยที่  $E^t$  คือ สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ  
 $E^{a1} \ E^{a2} \ \dots \ E^{an}$  คือ สนามไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนในเนื้อวัตถุ  
 $E^{r1} \ E^{r2} \ \dots \ E^{rn}$  คือ สนามไฟฟ้าที่กระเจิงออกจากวัตถุ





รูปที่ 2.1 ปปรากฏการณ์คลื่นเมื่อตกกระทบวัตถุ

### การกระเจิงของคลื่นจากเป้า

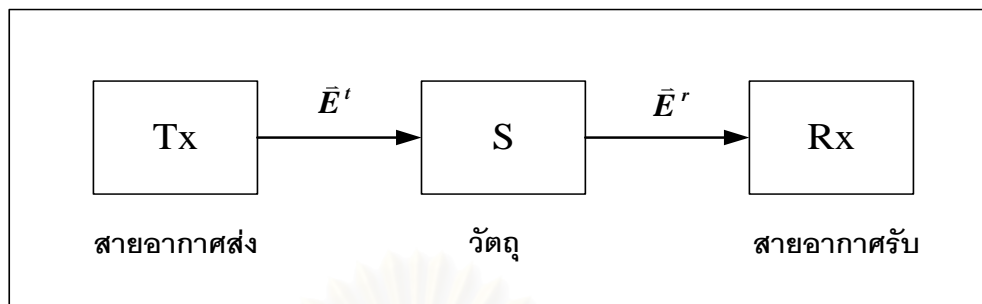
เมื่อมีคลื่นตกกระทบเป้า คลื่นกระเจิงที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับคลื่นตกกระทบ และสมบัติเฉพาะตัวของเป้านั้น ทั้งจากลักษณะทางกายภาพภายนอกและจากสมบัติภายใน เช่น ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปทรง ความชื้น ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ค่าความซึมซาบได้ของเป้า เป็นต้น คลื่นกระเจิงในแต่ละทิศทางจะนำข้อมูลของเป้าในทิศทางนั้นกลับออก ดังนั้นการวัดคลื่นกระเจิงจากเป้าจึงขึ้นอยู่กับว่าจะพิจารณาคลื่นในทิศทางใด ซึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกวางตำแหน่งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ คลื่นกระเจิงจากเป้าในทิศทางที่วัดมีความสัมพันธ์กับสมบัติเฉพาะตัวของเป้าและคลื่นตกกระทบ เสมือนว่าเป้าเป็นระบบที่สามารถแปลงคลื่นตกกระทบไปเป็นคลื่นกระเจิง โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของระบบคือ เมทริกซ์การกระเจิง (scattering matrix) ดังสมการที่ (2.2) และสามารถอธิบายได้โดยง่ายดังรูปที่ 2.2

$$\mathbf{E}^r = \frac{e^{jkr}}{r} \mathbf{S} \mathbf{E}^t \quad (2.2)$$

โดยที่  $\mathbf{E}^r$  คือ สนามไฟฟ้าที่กระเจิงออกจากเป้า  
 $\mathbf{E}^t$  คือ สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ  
 $\mathbf{S}$  คือ เมทริกซ์การกระเจิงของเป้า  
 $r$  คือ ระยะห่างจากเป้าถึงสายอากาศรับ



$k$  คือ เลขคลื่น (wave number) ของคลื่นตกกระทบ



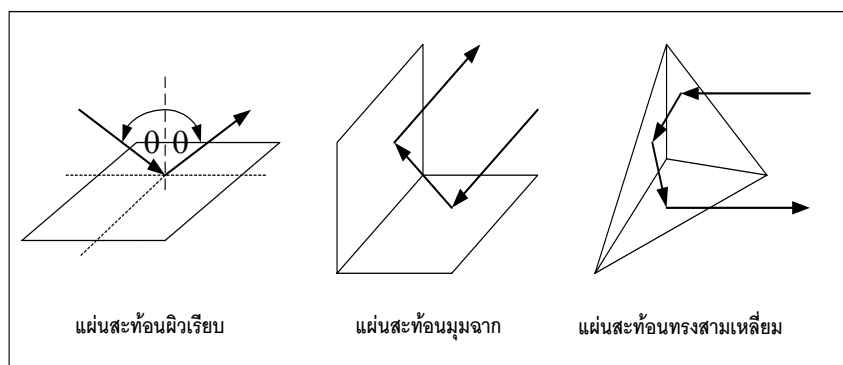
รูปที่ 2.2 ระบบการกระเจิงของเป้า

เมทริกซ์การกระเจิงสามารถแสดงสมบัติของเป้าที่ทำให้เกิดคลื่นกระเจิงได้ เป้าต่างชนิดกันหรือต่างสถานะกันมีสมบัติทำให้เกิดคลื่นกระเจิงได้ต่างกัน การวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงของเป้าที่มีการกระเจิงอย่างอิสระโดยสมมติว่าเป้านั้นมีการกระเจิงอย่างสม่ำเสมอ การวัดเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าที่ใช้อธิบายสมบัติของเป้าจะต้องทำที่ตำแหน่งต่างๆ หลายๆ ตำแหน่งแล้วใช้ค่าเฉลี่ยทางสถิติเป็นตัวแทนของข้อมูล

### เป้าของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง

ขนาดและทิศทางของคลื่นที่กระเจิงกลับมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของเป้าและลักษณะพื้นผิว เช่น พื้นผิวเรียบมีการกระเจิงที่แน่นอนด้วยกฎการสะท้อน พื้นผิวหยาบมีการกระเจิงอิสระไม่เป็นระเบียบ เป้าของระบบวัดการกระเจิงแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

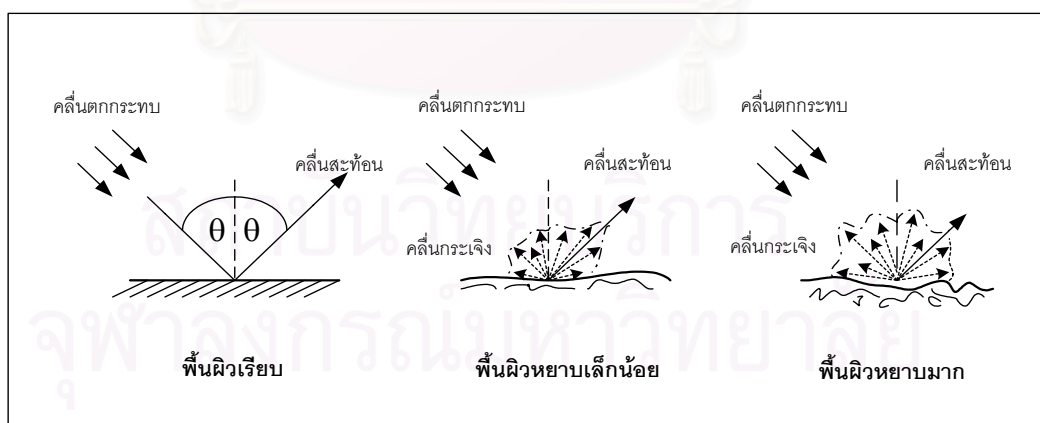
1. เป้าแบบจุด (point target) เป็นเป้าที่มีโครงสร้างอย่างง่าย มีการสะท้อนที่แน่นอน และกำลังของคลื่นสะท้อนไม่ขึ้นกับขนาดของเป้า ทิศทางของคลื่นสะท้อนเป็นไปตามกฎของการสะท้อน เสมือนว่าคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนเกิดจากผิวของเป้าที่จุดเดียว ดังรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปเรานิยมใช้เป้าแบบจุดในการเปรียบเทียบ เพราะสามารถคำนวณคลื่นกระเจิงด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ และทราบทิศทางการสะท้อนกลับที่แน่นอน



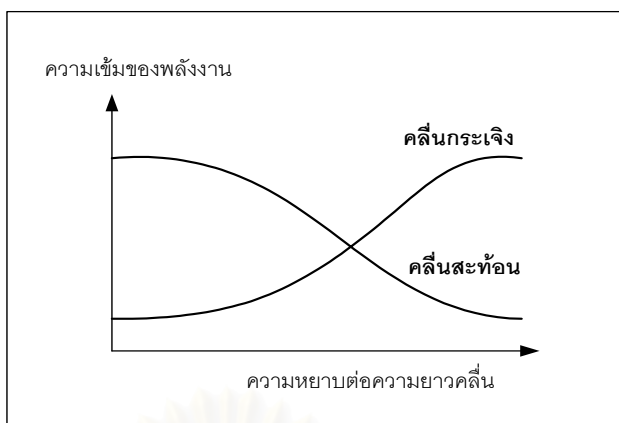
รูปที่ 2.3 เป้าแบบจุดชนิดต่างๆ

2. เป้ากระจาย (distributed target) เป็นเป้าที่มีการกระจายไม่เป็นระเบียบ ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายมาแทนได้ ขนาดและทิศทางของคลื่นกระเจิงขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างภายนอก ลักษณะของพื้นผิว และสมบัติภายในของเป้า สามารถแบ่งการกระเจิงได้สองลักษณะ คือ

-การกระเจิงบนพื้นผิว (surface scattering) คลื่นที่กระเจิงจะมีทิศทางและปริมาณแตกต่างกันขึ้นกับความเรียบของพื้นผิวและเนื้อสารชั้นบน เมื่อพื้นผิวหยาบมากขึ้นการกระเจิงจะไม่เป็นระเบียบมากขึ้น และความเข้มของพลังงานในทิศที่สะท้อนจะลดลง แต่ความเข้มของพลังงานที่กระเจิงกลับมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5

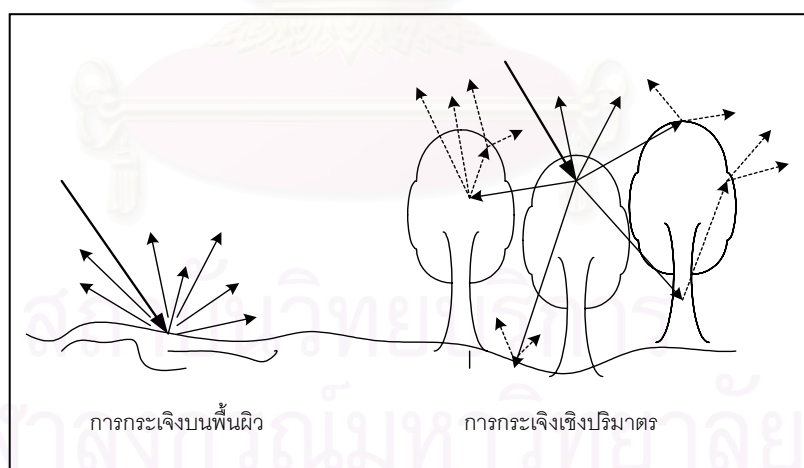


รูปที่ 2.4 การกระเจิงจากพื้นผิวต่างๆ ของเป้ากระจาย



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความหยาบต่อความยาวคลื่น กับความเข้มของพลังงานจากคลื่นกระเจิงและคลื่นสะท้อน

- การกระเจิงเชิงปริมาตร (volume scattering) เป็นการกระเจิงเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของเป้า มีการกระเจิงจากพื้นผิวและจากเนื้อสารภายใน มีกลไกการกระเจิงที่ซับซ้อน ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายมาแทนได้ การศึกษาเป้าประเภทนี้จึงต้องทำด้วยการทดลองเท่านั้น เช่น การสำรวจป่า ภูเขาน้ำแข็ง แปลงปลูกพืชไร่ เป็นต้น รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการกระเจิงอย่างง่ายของการกระเจิงบนพื้นผิวและการกระเจิงเชิงปริมาตร



รูปที่ 2.6 การกระเจิงบนพื้นผิวและการกระเจิงเชิงปริมาตร

เป้าของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงในวิทยานิพนธ์นี้เป็นพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ กัน เมื่อพืชไร่มีสถานะการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนไปย่อมส่งผลให้คลื่นกระเจิงที่วัด

ได้มีค่าเปลี่ยนไป โดยมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของพืชไร่ 2 ประการ คือ การเปลี่ยนแปลงภายในและการเปลี่ยนแปลงภายนอก

การเปลี่ยนแปลงภายในได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อเยื่อและเซลล์ของพืชไร่ ความชื้น ความหนาแน่น ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก และองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปเมื่อพืชไร่อยู่ในสถานะการเจริญเติบโตที่ต่างกัน เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงภายในนี้จะทำให้คุณสมบัติการกระเจิงของพืชไร่เปลี่ยนไป เช่น เมื่อความชื้นของพืชไร่เปลี่ยนไปเมื่อพืชไร่มีอายุเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกเปลี่ยนไป [8]

การเปลี่ยนแปลงภายนอกได้แก่การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพภายนอกของพืชไร่ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพืชไร่ และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทรงพุ่มของพืชไร่

- การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพืชไร่เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง และลักษณะทางเรขาคณิตของส่วนประกอบของพืชไร่แต่ละต้น [9] ได้แก่ ลำต้น ใบ กิ่ง และดอก เป็นต้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังนี้ 1. การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของส่วนประกอบต่างๆ ของพืชไร่ เช่น ทานตะวันเมื่อมีอายุเปลี่ยนไปขนาดและรูปร่างของใบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่ออายุน้อยๆ ใบจะเป็นรูปสามเหลี่ยมฐานโค้งขนาดยาวประมาณ 8-10 เซนติเมตร เมื่ออยู่ในช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น ใบจะเปลี่ยนเป็นรูปหัวใจขนาดใหญ่ยาวประมาณ 20-25 เซนติเมตร ขอบใบมีรอยหยักอย่างชัดเจน เมื่ออยู่ในช่วงการเจริญเติบโตทางการเจริญพันธุ์ผิวใบจะมีความขรุขระมากขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดและลักษณะของดอกเป็นต้น เมื่อขนาดและรูปร่างของส่วนประกอบของพืชไร่ซึ่งเป็นเป้าเปลี่ยนไปคลื่นกระเจิงที่วัดได้ย่อมเปลี่ยนไป 2. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางการวางตัวของส่วนประกอบของพืชไร่ เช่น เมื่อข้าวโพดหวานมีอายุมากขึ้นใบส่วนใหญ่จะกางเอียงออกรอบลำต้นในแนวระดับมากขึ้น เมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้นปลายของกิ่งแต่ละกิ่งจะมีทิศสูงขึ้นในแนวตั้งมากขึ้น เมื่อทิศทางการวางตัวของส่วนประกอบพืชไร่เปลี่ยนไปย่อมทำให้คลื่นกระเจิงในทิศทางต่างๆ เปลี่ยนไป 3. การเปลี่ยนแปลงจำนวนและความหนาแน่นของส่วนประกอบของพืชไร่ที่ทำให้เกิดการกระเจิงคลื่น เช่น เมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้นจะมีความหนาแน่นของจำนวนใบมากขึ้นจึงทำให้ลักษณะการกระเจิงคลื่นของเป้าเปลี่ยนไป

- การเปลี่ยนแปลงลักษณะทรงพุ่มของพีชไร่ เมื่อทรงพุ่มของพีชไร่เปลี่ยนไปจะทำให้พฤติกรรมในการกระเจิงคลื่นของพีชไร่เปลี่ยนแปลงไป [8] เช่น เมื่อถั่วลิสงยังมีอายุน้อยแต่ระดับต้นจะมีลักษณะเป็นทรงพุ่มรอบๆ จุดที่ปลูก เมื่อมีคลื่นมาตกกระทบจะทำให้มีลักษณะการกระเจิงเชิงปริมาตร แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นกิ่งและใบของถั่วลิสงจะขยายออกไปในแนวราบทำให้มีลักษณะการคลุมดินที่มากขึ้นเนื่องจากมีความหนาแน่นของจำนวนใบต่อพื้นที่มากขึ้น จึงทำให้เมื่ออายุมากขึ้นจะมีการกระเจิงเชิงพื้นผิวมากกว่าการกระเจิงเชิงปริมาตร

### สถานะโพลาไรเซชัน (Polarization state)

เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบใดๆ  $\mathbf{E}$  ที่มีองค์ประกอบสององค์ประกอบตามแนวโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกัน และตั้งฉากกับการเคลื่อนที่  $\mathbf{E}_v$  และ  $\mathbf{E}_h$  เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า  $\mathbf{E}$  ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ ดังสมการที่ (2.3)

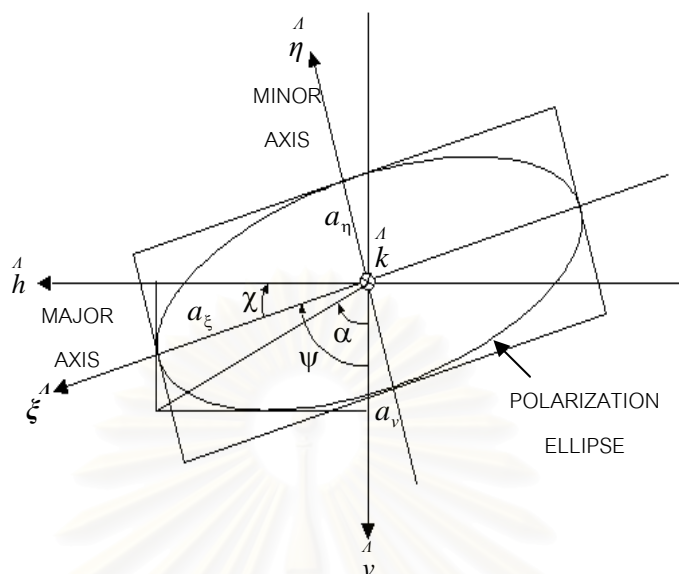
$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_v \\ \mathbf{E}_h \end{bmatrix} \quad (2.3ก)$$

$$\mathbf{E}_v = a_v e^{-i\delta_v} \quad (2.3ข)$$

$$\mathbf{E}_h = a_h e^{-i\delta_h} \quad (2.3ค)$$

โดยที่  $a_v$  และ  $a_h$  คือ ขนาดสนามไฟฟ้าของคลื่นในแนวโพลาไรเซชัน V และ H ตามลำดับ  
 $\delta_v$  และ  $\delta_h$  คือ วัฏภาคของสนามไฟฟ้าของคลื่นในแนวโพลาไรเซชัน V และ H ตามลำดับ

การอธิบายโพลาไรเซชันของคลื่น  $\mathbf{E}$  สามารถอธิบายด้วยเส้นทางเดินของการหมุนของปลายเวกเตอร์สนามไฟฟ้าบนระนาบ HV โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นวงรี เรียกว่า วงรีโพลาไรเซชัน (polarization ellipse) สัดส่วนของรูปวงรีนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้าในแนวโพลาไรเซชันแต่ละแนว  $a_v$  และ  $a_h$  และความต่างวัฏภาคขององค์ประกอบทั้งสอง  $\delta$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงรีโพลาไรเซชัน

$$\text{โดยที่ } \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{a_h}{a_v} \right) \quad 0 \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$\delta = \delta_h - \delta_v \quad 180 \leq \delta \leq 180^\circ$$

จากรูปที่ 2.7 ขนาดของความยาวแกนเอกและแกนโทของวงรีโพลาไรเซชันถูกแทนด้วยสัญลักษณ์  $2a_\xi$  และ  $2a_\eta$  ตามลำดับ การอธิบายรูปร่างและทิศทางการหมุนของวงรีโพลาไรเซชันสามารถแสดงด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ 1. มุมการหมุน (rotation angle:  $\psi$ ) และ 2. มุมความรี (ellipticity angle:  $\chi$ ) ซึ่งรวมเรียกว่า มุมโพลาไรเซชัน (polarization angle) มุม  $\psi$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนเอกของวงรีกับแนวที่ใช้อ้างอิง ในวิทยานิพนธ์ใช้แนว V เป็นแนวอ้างอิงดังรูปที่ 2.7 มุม  $\psi$  เป็นมุมที่ใช้แสดงค่าความเอียงของวงรีโพลาไรเซชัน มุม  $\chi$  เป็นมุมที่ใช้อธิบายรูปร่างของวงรี โดยมุม  $\chi$  มีความสัมพันธ์กับความยาวแกนเอกและแกนโทของวงรีโพลาไรเซชันตามสมการที่ (2.4)

$$\tan \chi = \pm \frac{a_\eta}{a_\xi} \quad (2.4)$$



และมุม  $\chi$  ยังสามารถแสดงทิศทางการหมุนของสนามไฟฟ้าอีกด้วย คือถ้ามุม  $\chi > 0$  จะมีการหมุนของสนามไฟฟ้าแบบวนซ้าย หรือถ้า  $\chi < 0$  จะมีการหมุนของสนามไฟฟ้าแบบวนขวา

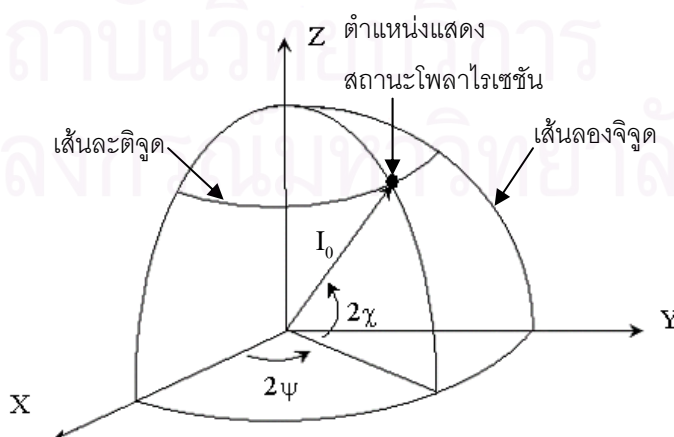
ขนาดของวงรีของโพลาริเซชันจะมีค่าแปรไปตามขนาดของสนามแม่เหล็กในแนวโพลาริเซชันแต่ละแนว ซึ่งถ้าวงรีมีสถานะโพลาริเซชันเดียวกัน คือ มีมุม  $\psi$  และ  $\chi$  เท่ากัน ขนาดของวงรีจะแปรผันตรงกับผลรวมของความเข้มคลื่นทั้ง 2 แนวโพลาริเซชัน  $I_0$  ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.5)

$$I_0 = a_v^2 + a_h^2 \quad (2.5)$$

มุม  $\psi$  และ  $\chi$  มีความสัมพันธ์กับขนาดและความต่างเฟสของสนามไฟฟ้าทั้ง 2 แนวโพลาริเซชัน ตามสมการที่ (2.6) และ (2.7) และการอธิบายสถานะโพลาริเซชันของคลื่นใดๆ สามารถแสดงด้วยตำแหน่งบนทรงกลมปวงกาเร (Poincare Sphere) ที่มีรัศมีของทรงกลมเป็น  $I_0$  โดยที่ขนาดมุม  $2\chi$  และ  $2\psi$  เป็นค่าที่แสดงตำแหน่งของเส้นละติจูดและลองจิจูดของทรงกลมตามลำดับ ดังรูปที่ 2.8 และแสดงความสัมพันธ์ของวงรีโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร ดังรูปที่ 2.9

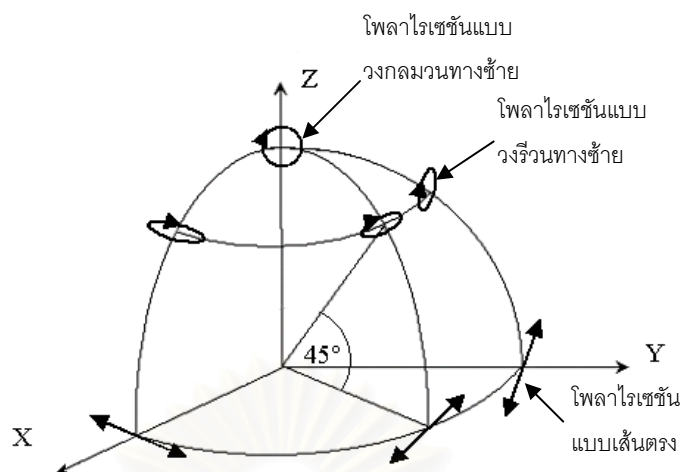
$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1}(\tan 2\alpha \cos \delta) \quad ; \quad -90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \quad (2.6)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \sin^{-1}(\sin 2\alpha \sin \delta) \quad ; \quad -45^\circ \leq \chi \leq 45^\circ \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร





รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของวงรีโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร

### พารามิเตอร์พื้นฐานที่แสดงสมบัติของเป้าจากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

ข้อมูลที่ได้จากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงจะนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของเป้ากับคลื่นกระเจิง โดยผ่านทางพารามิเตอร์ที่จะกล่าวต่อไป พารามิเตอร์แต่ละตัวจะให้ข้อมูลของเป้าในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ต่างกัน ซึ่งมาจากแนวทางที่ใช้พิจารณาสมบัติการกระเจิงของคลื่นจากเป้าในมุมมองที่ต่างกัน โดยแต่ละตัวจะมีข้อเด่นและข้อด้อยต่างกัน พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดทิศทางตามระบบโคออร์ดิเนตของสายอากาศรับและสายอากาศส่งเป็นหลักหรือที่เรียกว่า ระบบ BSA (back scatter alignment) [1]

### เมทริกซ์การกระเจิง

เมทริกซ์การกระเจิงเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบกับคลื่นกระเจิงจากเป้า เสมือนว่าเป้าเป็นตัวแปลงคลื่นตกกระทบไปเป็นคลื่นกระเจิงในทิศทางที่ทำกรวัด มีการนำเสนอในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบ [1 10 และ 11] แต่ละรูปแบบมีรายละเอียดต่างกันเล็กน้อย แต่สื่อความหมายไปในทางเดียวกันและมีชื่อเรียกได้หลายชื่อ เช่น Jones matrix, Sinclair matrix ในวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกเมทริกซ์ดังกล่าวว่าเมทริกซ์

การกระเจิง (scattering matrix) และใช้สัญลักษณ์  $S$  จากสมการที่ (2.2) ถ้าพิจารณาคลื่นตกกระทบและคลื่นกระเจิงเป็นคลื่นที่มีองค์ประกอบสององค์ประกอบตามแนวโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกัน และตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ตามสมการที่ (2.3) ทำให้สามารถเขียนเมทริกซ์การกระเจิงได้ดังสมการที่ (2.8) และแสดงความสัมพันธ์กับของคลื่นตกกระทบและคลื่นกระเจิงกลับในรูปเมทริกซ์การกระเจิงได้ดังสมการที่ (2.9)

$$S = \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} E_v^r \\ E_h^r \end{bmatrix} = \frac{e^{ikr}}{r} \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^t \\ E_h^t \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

โดยที่  $E_v^r$  และ  $E_h^r$  คือ องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบในแนวโพลาไรเซชัน V และ H ตามลำดับ

$E_v^t$  และ  $E_h^t$  คือ องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของคลื่นกระเจิงจากเป้าในแนวโพลาไรเซชัน V และ H ตามลำดับ

$S_{vv}$   $S_{vh}$   $S_{hv}$  และ  $S_{hh}$  คือ องค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงของเป้า

องค์ประกอบของเมทริกซ์การกระเจิงแต่ละตัวนั้นเป็นจำนวนเชิงซ้อน เนื่องจากทั้งขนาดและวิภาคของคลื่นกระเจิงเปลี่ยนไปจากของคลื่นตกกระทบ โดยค่าขององค์ประกอบทั้ง 4 จะขึ้นกับทิศทางของคลื่นตกกระทบ ( $\theta_i, \phi_i$ ) ทิศทางของคลื่นกระเจิงที่วัด ( $\theta_s, \phi_s$ ) และทิศทางการวางตัวของเป้า ( $\theta_j, \phi_j$ ) ตัวอย่างเช่น ใบบไม้ ทิศทางของมันถูกกำหนดให้เป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของใบบไม้ ดังนั้นองค์ประกอบของเมทริกซ์การกระเจิงสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.10) ดังนี้

$$S_{pq} = S_{pq}(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i; \theta_j, \phi_j) \quad p, q = v, h \quad (2.10)$$

สโตกส์เวกเตอร์และระดับชั้นโพลาไรเซชัน

1. สโตกส์เวกเตอร์ (Stokes vector) ใช้สัญลักษณ์  $F$  เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงทั้งสถานะโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงและความสัมพันธ์ของความเข้มของคลื่นในแนวโพลาไรเซชัน

แต่ละแนว ประกอบด้วย สโตกส์พารามิเตอร์ 4 ตัว คือ  $I_0$   $Q$   $U$  และ  $V$  ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.11)

$$F = \begin{bmatrix} I_0 \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_v|^2 + |E_h|^2 \\ |E_v|^2 - |E_h|^2 \\ 2R_e[E_v E_h^*] \\ 2I_m[E_v E_h^*] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_v^2 + a_h^2 \\ a_v^2 - a_h^2 \\ 2a_v a_h \cos \delta \\ 2a_v a_h \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_0 \cos 2\psi \cos 2\chi \\ I_0 \sin 2\psi \cos 2\chi \\ I_0 \sin 2\chi \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $I_0$  แสดงความเข้มทั้งหมดของคลื่น  $Q$  แสดงความแตกต่างของความเข้มของคลื่นทั้ง 2 แนวโพลาไรเซชัน คือ โพลาไรเซชัน V และ H ส่วน  $U$  กับ  $V$  ร่วมกันแสดงความต่างวัฏภาคของคลื่นทั้งสองแนวโพลาไรเซชัน สโตกส์เวกเตอร์จะใช้ในกรณีคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบสมบรูณ์ ซึ่งจะทำให้สโตกส์พารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (2.12)

$$I_0^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad (2.12)$$

สโตกส์พารามิเตอร์ของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบสมบรูณ์สามารถแสดงสถานะโพลาไรเซชันได้ โดยจะชี้ไปยังตำแหน่งหนึ่งบนทรงกลมปวงกาเร เมื่อ  $I_0$  จะเป็นรัศมีของทรงกลม และจุด  $(U, Q, V)$  จะเป็นตำแหน่งตามระบบพิกัดมุมฉากของตำแหน่งนั้น

องค์ประกอบทั้ง 4 ของสโตกส์เวกเตอร์ตามสมการที่ (2.11) เป็นการพิจารณาโดยค่าพารามิเตอร์ของคลื่น  $a_v$   $a_h$  และ  $\delta$  เป็นค่าคงที่ แต่ในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวจะแปรไปตามตำแหน่ง ค่าที่ใช้แสดงสมบัติโพลาไรเซชันของคลื่นจึงเป็นค่าเฉลี่ยทางสถิติทำให้คลื่นที่วัดได้ส่วนมากเป็นคลื่นที่มีโพลาไรเซชันบางส่วน (partially polarized) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

$$F = \begin{bmatrix} I_0 \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |E_v|^2 \rangle + \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle |E_v|^2 \rangle - \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle 2R_e(E_v E_h^*) \rangle \\ \langle 2I_m(E_v E_h^*) \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle a_v^2 \rangle + \langle a_h^2 \rangle \\ \langle a_v^2 \rangle - \langle a_h^2 \rangle \\ \langle 2a_v a_h \cos \delta \rangle \\ \langle 2a_v a_h \sin \delta \rangle \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\langle \rangle$  แสดงค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ย

สำหรับกรณีคลื่นที่ไม่มีสมบัติโพลาไรเซชันแบบสมบรูณ์  $\langle |E_v|^2 \rangle = \langle |E_h|^2 \rangle$  และ  
 สนามแม่เหล็กในแนวโพลาไรเซชันทั้ง 2 แนวที่ตั้งฉากกันจะไม่มีสหสัมพันธ์ต่อกันเลย  
 (uncorrelated) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.14)

$$\mathbf{F}_{un} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} I_0 \quad (2.14)$$

โดยทั่วไปสำหรับคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบบางส่วน สโตกส์พารามิเตอร์ทั้ง 4 จะมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (2.15)

$$I_0^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2 \quad (2.15)$$

2. ระดับชั้นโพลาไรเซชัน (degree of polarization) คือ อัตราส่วนของความเข้ม  
 คลื่นที่มีโพลาไรเซชันต่อความเข้มของคลื่นทั้งหมด ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $d$  และสามารถแสดง  
 ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$d = \frac{\text{Polarized power}}{\text{total power}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I_0} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.18) และสมการที่ (2.21) ทำให้สามารถเขียนสโตกส์เวกเตอร์ของ  
 คลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบบางส่วนในรูปของสโตกส์เวกเตอร์ของคลื่นที่ไม่มีโพลาไรเซชันแบบ  
 สมบรูณ์ ( $\mathbf{F}_{un}$ ) และสโตกส์เวกเตอร์ของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบสมบรูณ์ ( $\mathbf{F}_p$ ) ดังแสดงใน  
 สมการที่ (2.17) และ (2.18) ตามลำดับ

$$\mathbf{F} = (1-m)\mathbf{F}_{un} + m\mathbf{F}_p \quad (2.17)$$

$$\mathbf{F}_p = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\psi_p \cos 2\chi_p \\ \sin 2\psi_p \cos 2\chi_p \\ \sin 2\chi_p \end{bmatrix} I_0 \quad (2.18)$$

## ยูนิตสโตกส์พารามิเตอร์และอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน

การเปรียบเทียบสถานะโพลาริเซชันของคลื่นด้วยตำแหน่งบนทรงกลมปวงกาเร โดยไม่สนใจขนาดหรือความเข้มของสนามไฟฟ้าสามารถทำได้โดยพิจารณาจากตำแหน่งบนทรงกลมปวงกาเรที่มีรัศมีหนึ่งหน่วย สามารถพิจารณาได้ 2 วิธี วิธีแรกพิจารณาจากค่ามุม  $2\chi$  และ  $2\psi$  ซึ่งเป็นค่าที่แสดงตำแหน่งของเส้นละติจูดและลองจิจูดของทรงกลมปวงกาเรดังสมการที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อสถานะโพลาริเซชัน วิธีที่ 2 เปลี่ยนทรงกลมปวงกาเรที่มีรัศมี  $I_0$  ให้มีรัศมีเป็นหนึ่งหน่วยด้วยการนำ  $I_0$  ไปหารค่าทุกค่าของสโตกส์พารามิเตอร์ ดังนั้นเมื่อคลื่นมีสถานะโพลาริเซชันที่เหมือนกันจะชี้ไปยังตำแหน่งเดียวกัน ผู้วิจัยขอตั้งชื่อค่าที่ได้จากการนำ  $I_0$  ไปหารสโตกส์พารามิเตอร์ว่ายูนิตสโตกส์พารามิเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.19)

$$U_F = \frac{\mathbf{F}}{I_0} = \frac{1}{I_0} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ q \\ u \\ v \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

ยูนิตสโตกส์พารามิเตอร์ทั้งสามตัวซึ่งประกอบด้วย  $q$   $u$  และ  $v$  จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพิจารณาสถานะโพลาริเซชันของเป้า โดยเฉพาะ  $q$  ซึ่งแสดงอัตราส่วนความแตกต่างของความเข้มคลื่นในแนว V และ H เทียบกับความเข้มคลื่นทั้งหมดที่วัดได้ ผู้วิจัยขอเรียกค่าดังกล่าวว่า อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน และจะใช้ค่า  $q$  เป็นดัชนีตัวหนึ่งเพื่อพิจารณาแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ เนื่องจากเป็นดัชนีที่สามารถแสดงสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นได้อย่างชัดเจนในอีกแง่มุมหนึ่งที่ต่างกับดัชนีตัวอื่นที่เคยมีการใช้กันเพื่อแยกประเภทของเป้า จากงานวิจัยในอดีต และจากข้อมูลการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ที่ได้จากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง พบว่าค่า  $q$  สามารถแยกข้อมูลออกเป็นกลุ่มได้ตามสถานะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ส่วนค่า  $u$  และ  $v$  ไม่พบว่าน่าสนใจในการพิจารณาใช้เป็นดัชนีเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่เนื่องจากไม่สามารถแยกข้อมูลจากสถานะการเจริญเติบโตที่ต่างกันออกจากกันได้ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการใช้สโตกส์เวกเตอร์ [10 12 และ 13] จะพิจารณาสโตกส์พารามิเตอร์ทุกตัวร่วมกัน และใช้เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณต่อเพื่อหาดัชนีตัวอื่นๆ เช่น ระดับชั้นโพลาริเซชันและ Mueller matrix เป็นต้น แต่ไม่ได้ใช้เป็นดัชนีเพื่อแยกประเภทเป้า

### บทที่ 3

## ระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง และรายละเอียดการทดลอง

วัตถุประสงค์หนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ก็คือการพัฒนาบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง เพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ โดยต้องสามารถนำระบบวัดที่พัฒนาขึ้นไปวัดและเก็บข้อมูลพืชไร่ในภาคสนามได้ ดังนั้นการออกแบบและสร้างระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงในวิทยานิพนธ์นี้ต้องสามารถตอบสนองความต้องการของการใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม วิทยานิพนธ์นี้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่จากแปลงทดลอง เพราะต้องการควบคุมปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และเพื่อยืนยันความแนวคิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจึงทำการทดลองกับพืชไร่ 3 ชนิดที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันอย่างชัดเจน

บทนี้จะประกอบด้วยเนื้อหาส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วน ส่วนแรกกล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง ปัจจัยที่ใช้พิจารณาในการออกแบบ โครงสร้างของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ส่วนที่ 2 กล่าวถึงพืชไร่ที่ใช้ในการติดตามการเจริญเติบโตได้แก่ ถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวาน และส่วนที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของการทดลองและการวัดเก็บข้อมูล ขั้นตอนการดำเนินการวัดเก็บข้อมูล ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการวัดเก็บข้อมูล

### แนวคิดในการออกแบบระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง

การออกแบบระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงให้เป็นไปตามความต้องการในการใช้งาน ต้องศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบวัดนี้ทั้งหมด ปัจจัยต่างๆ ที่พิจารณาประกอบด้วยกลุ่มใหญ่ๆ 2 กลุ่มคือ ปัจจัยในการออกแบบตามหลักการของระบบวัด และปัจจัยในการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับระบบวัดทางกายภาพ

#### ปัจจัยในการออกแบบตามหลักการของระบบวัด

ความถี่

คลื่นไมโครเวฟที่ใช้งานในระบบวัดการกระเจิง อยู่ในช่วงความถี่ 0.3 ถึง 40 GHz ถูกแบ่งเป็นย่านความถี่ต่างๆ คือ



ความถี่ย่าน P มีความถี่อยู่ในช่วง 0.3 GHz ถึง 1 GHz  
 ความถี่ย่าน L มีความถี่อยู่ในช่วง 1 GHz ถึง 2 GHz  
 ความถี่ย่าน S มีความถี่อยู่ในช่วง 2 GHz ถึง 4 GHz  
 ความถี่ย่าน C มีความถี่อยู่ในช่วง 4 GHz ถึง 8 GHz  
 ความถี่ย่าน X มีความถี่อยู่ในช่วง 8 GHz ถึง 12.5 GHz  
 ความถี่ย่าน K มีความถี่อยู่ในช่วง 12.5 GHz ถึง 40 GHz

ความถี่ที่นิยมใช้ในระบบวัดการกระเจิง ก็คือย่านความถี่ X C และ L เพราะขนาดของความยาวคลื่นไม่ยาวหรือสั้นจนเกินไปเมื่อเทียบกับลักษณะของเป้า ถ้ามีความยาวคลื่นสั้นเกินไป ข้อมูลที่วัดได้จะมีผลเนื่องจากสัญญาณรบกวนมาก แต่ถ้ามีความยาวคลื่นยาวเกินไปคลื่นจะทะลุเป้าไปถึงผิวดินทำให้มีผลของดินมากกว่าผลของเป้า จาก [3 6 และ 7] พบว่าในการทำแผนที่เมืองที่มีอาคาร ถนน และสิ่งปลูกสร้างมากๆ ย่านความถี่ L จะให้ผลที่ดีกว่า แต่ถ้าเป็นแผนที่ชนบทซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เพาะปลูก ย่านความถี่ C และ X จะให้ผลดีกว่า

ในวิทยานิพนธ์นี้มีเป้าของการวัดเป็นพีซีไร่ เมื่อพิจารณาจากขนาดความยาวคลื่นและงานวิจัยในอดีต [3 6 และ 7] ย่านความถี่ที่เหมาะสมกับระบบวัดที่มีเป้าเป็นพีซีไร่ ได้แก่ ย่านความถี่ C และ X ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ให้ข้อมูลของพีซีไร่ด้วยการวัดคลื่นกระเจิงมากที่สุด เพราะจะมีผลของดินและสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าย่านความถี่ L

ห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีสายอากาศย่านความถี่ C และ L พร้อมอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นจึงออกแบบให้ระบบวัดที่สร้างขึ้นใช้สายอากาศย่านความถี่ C

โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

ระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงจะต้องวัดคลื่นกระเจิงในแนวโพลาริเซชันทั้ง 2 แนวที่ตั้งฉากกัน ถ้าต้องการข้อมูลของเมทริกซ์การกระเจิงครบทั้งสี่องค์ประกอบ จะต้องวัดคลื่นโดยการเปลี่ยนสายอากาศรับและส่งทั้งสองให้อยู่ในแนวเดียวกันและแนวที่ตั้งฉากกันสลับไปมา 4 กรณี คือ HH HV VH และ VV การออกแบบต้องทำให้สามารถปรับเปลี่ยนแนวสายอากาศรับและส่งในแนวโพลาริเซชันทั้ง 2 แนวที่ตั้งฉากกัน ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การปรับเปลี่ยนแนวสายอากาศด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนทางกล เพราะต้องการการเปลี่ยนแนวที่ตั้งฉากกันเพียงแค่สอง



แนว การปรับทางกลสามารถทำได้ มีความแม่นยำเพียงพอ และมีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากแก่โครงสร้างของส่วนที่ใช้จับยึดสายอากาศของระบบวัด และสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกรวดเร็วขณะวัด

การออกแบบการปรับเปลี่ยนแนวของสายอากาศด้วยการใช้วงจรถิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ แม้จะสะดวกในการใช้งาน มีความแม่นยำสูงกว่า และสามารถปรับได้ทุกแนว แต่ไม่มีความจำเป็นในการใช้งานครั้งนี้ และยังมีน้ำหนักของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ต้องเพิ่มความแข็งแรงโครงสร้างของชุดหัวจับสายอากาศ จึงทำให้เกิดความไม่สะดวกในการติดตั้งและเคลื่อนย้าย

มุมมองการรับและการส่งคลื่นกระเจิง

ระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงที่ออกแบบไว้เป็นระบบวัดที่มีการวางสายอากาศรับและสายอากาศส่งเป็นแบบระบบวัดเสมือนเอกสถิติ ซึ่งสามารถออกแบบได้ง่ายและเหมาะสมกับการใช้งาน เพราะตำแหน่งของสายอากาศทั้งสองอยู่ที่เดียวกัน และยังสามารถนำไปประยุกต์เป็นระบบวัดบนเครื่องบินได้ การออกแบบเลือกใช้การส่งคลื่นตกกระทบลงไปแนวตั้งและวัดคลื่นที่กระเจิงกลับมาในแนวเดียวกัน โดยวางตำแหน่งของสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ออกแบบไว้ทำมุม 0 องศากับแนวตั้ง เพราะพีชไร์ที่ปลูกอยู่บนพื้นราบทำให้คลื่นที่กระเจิงกลับและคลื่นสะท้อนมีทิศทางเดียวกัน จึงทำให้สามารถวัดคลื่นกระเจิงกลับที่มีความเข้มของพลังงานมากเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป

เป้า

วิทยานิพนธ์นี้ใช้พีชไร์เป็นเป้าของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง ซึ่งจัดเป็นเป้าประเภทเป้ากระจายเชิงปริมาตร ที่มีการกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงมีทิศทางการกระเจิงของคลื่นเป็นแบบอิสระ ในการวัดจึงต้องวัดหลายๆ ตำแหน่ง แล้วใช้ค่าเฉลี่ยทางสถิติเป็นตัวแทนของข้อมูล และเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูลด้วย เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงกับพีชไร์ที่เป็นเป้าในสถานะการเจริญเติบโตที่ต่างกัน

พีชไร์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพดหวาน ถั่วลิสง และทานตะวัน ถูกปลูกในแปลงทดลอง 3 แปลง ที่มีขนาดเพียงพอแก่การวัดเก็บข้อมูลทั้งจากระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง และ

ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ ลักษณะแปลงทดลอง และสภาพแวดล้อมถูกจัดให้มีลักษณะเดียวกับการปลูกพืชไร่ที่เกษตรกรปลูกจริงในเชิงพาณิชย์

### ปัจจัยในการออกแบบเกี่ยวกับระบบวัดทางกายภาพ

#### ระบบจ่ายไฟฟ้า

ระบบวัดที่สร้างขึ้นจะต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบวัดอย่างเพียงพอตลอดการใช้งาน ขณะปฏิบัติงานวัดและเก็บข้อมูลจากแปลงทดลอง และมีคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่ดี เพราะอุปกรณ์ของระบบวัดประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน หากได้รับกำลังไฟฟ้าที่ด้อยคุณภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้

เนื่องจากแปลงทดลองพืชไร่อยู่ไม่ไกลจากจุดที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้าปกติได้ ดังนั้นระบบวัดที่สร้างขึ้นจึงสามารถต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้าปกติ โดยการใช้สายไฟที่สามารถใช้งานในภาคสนามได้ยาว 60 เมตร ในกรณีที่ต้องการนำระบบวัดไปวัดในจุดที่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าปกติได้ ก็สามารถใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบวัดของงานวิจัยก่อนหน้า [7] ด้วยการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบวัดจากอุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 1 kVA ที่ต่อร่วมกับแบตเตอรี่ภายนอกขนาด 12 โวลต์ 4 ลูก

#### การเคลื่อนย้ายและการขนย้าย

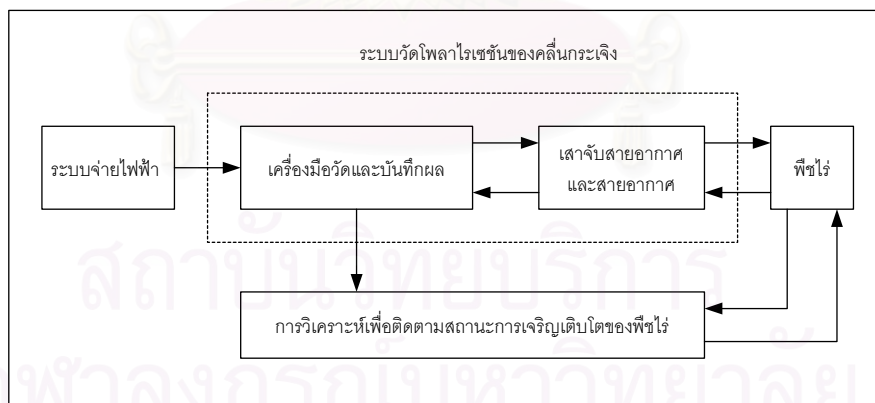
ระบบวัดที่สร้างขึ้นต้องสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการวัดและเก็บข้อมูลได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว และไม่ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในระบบวัดเกิดการกระทบกระเทือนหรือเกิดความเสียหาย เพราะในการวัดเก็บข้อมูลแต่ละครั้งมีตำแหน่งที่ต้องการวัดเป็นจำนวนมาก และเส้นทางที่ระบบวัดต้องเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการวัดเป็นถนนรอบแปลงทดลอง โดยสร้างขึ้นให้มีลักษณะเดียวกับถนนที่ใช้ภายในไร่ของเกษตรกรซึ่งมีความขรุขระมาก สภาพเป็นโคลนที่ลื่นมากในช่วงฤดูฝน แม้ช่วงเวลาทำการทดลองจะอยู่ในฤดูแล้ง แต่ก็มีฝนหลงฤดูตกบ้างเป็นครั้งคราว นอกจากนั้นระบบวัดที่สร้างขึ้นต้องสามารถถอดประกอบได้ง่าย มีน้ำหนักไม่มาก ใช้เวลาและแรงงานถอดประกอบน้อย เพื่อความสะดวกในการขนย้ายและเก็บรักษา เพราะสถานที่เก็บอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบวัดและแปลงทดลองอยู่ใกล้กันมาก

## สภาพแวดล้อม

เนื่องจากแปลงทดลองอยู่ในที่โล่งแจ้ง และในการวัดเก็บข้อมูลแต่ละครั้งต้องใช้ระยะเวลาตลอดทั้งวัน การได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นเวลานานเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถส่งผลทำให้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในระบบวัดเสียหายได้ แม้ช่วงเวลาที่ทำการทดลองจะอยู่ในฤดูแล้งแต่ก็ยังมีฝนหลงฤดูเป็นบางครั้ง ดังนั้นระบบวัดที่สร้างขึ้นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันฝนและแสงแดดให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ และผู้ปฏิบัติงาน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความร้อนของแสงแดดและน้ำฝน

## โครงสร้างของระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

ระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ เครื่องมือวัดและบันทึกผล และเสาจับสายอากาศและอุปกรณ์เสริมอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ส่วนแรกเป็นอุปกรณ์ที่จ่ายพลังงานให้แก่สายอากาศส่งและวัดสัญญาณที่ได้จากสายอากาศรับและอุปกรณ์บันทึกผล ส่วนที่สองเกี่ยวกับเสาจับสายอากาศที่สามารถถอดประกอบได้ โดยยึดบนตัวถังของรถกระบะ สายอากาศรับและสายอากาศส่ง ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ในแต่ละส่วนต้องคำนึงถึงปัจจัยที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างอย่างง่ายของระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

ในแต่ละส่วนของระบบวัดที่พัฒนาขึ้นมีเงื่อนไขในการสร้างดังนี้

#### เครื่องมือวัดและบันทึกผล

- สามารถจ่ายพลังงานให้แก่สายอากาศย่านความถี่ C ได้
- สามารถรับพลังงานจากสายอากาศย่านความถี่ C ได้ทั้งขนาดและภูมิภาค
- สามารถเก็บข้อมูลได้สะดวกและรวดเร็ว
- เคลื่อนที่และขนย้ายได้สะดวกและรวดเร็ว

#### เสาจับสายอากาศและอุปกรณ์เสริมอื่นๆ

- สามารถรับโพลาริเซชันของสายอากาศส่งและรับได้แม่นยำและสะดวก
- สามารถถอดประกอบและขนย้ายได้ง่าย ใช้เวลาและแรงงานถอดประกอบน้อย
- แข็งแรง ทนทาน และน้ำหนักไม่มาก
- เสียค่าใช้จ่ายน้อย

#### เครื่องมือวัดและบันทึกผล

การวัดคลื่นที่กระเจิงกลับจากพีซีไอใช้สายอากาศส่งและรับเป็นสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด ปากแตรพับจากแผ่นอะลูมิเนียมออกแบบใช้ในห้องปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้แก่สายอากาศส่งและรับคลื่นที่กระเจิงกลับคือ เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรร่วมกับชุดทดสอบพารามิเตอร์เอส ข้อมูลที่วัดได้จะบันทึกบนคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก โดยอาศัยแผงวงจรถ่าย PCMCIA-GPIB เพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรถ่าย อุปกรณ์ทั้งหมดนี้จะถูกจัดวางบนรถขนย้ายและนำขึ้นไปจับยึดบนกระบะของรถกระบะที่ใช้เป็นที่จับยึดโครงสร้างของเสาจับสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง

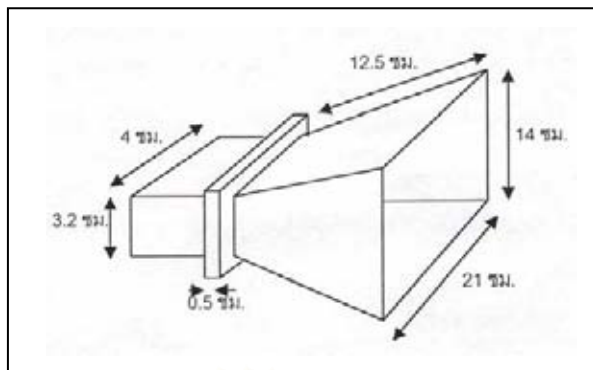
รายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ มีดังต่อไปนี้

สายอากาศส่งและสายอากาศรับ

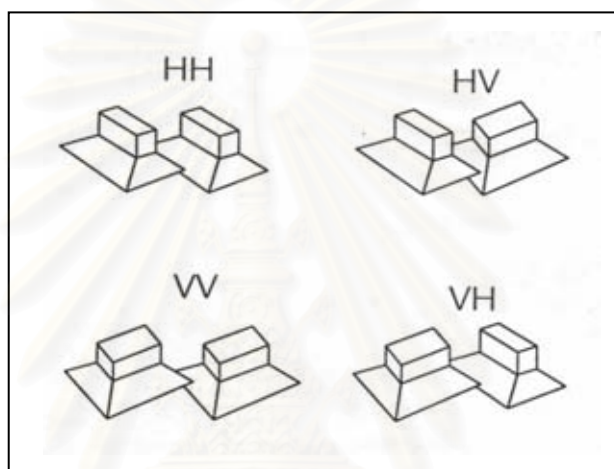
สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศชนิดปากแตรทรงพีระมิดที่เหมือนกันทุกประการ มีขนาดช่องเปิดกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 21 เซนติเมตร ทำมาจากแผ่นอะลูมิเนียม ออกแบบมาเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ C ดังรูปที่ 3.3 มีอัตราขยาย 13.4 เดซิเบล ความกว้างลำคลื่นกำลังของแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าประมาณ 30 องศา และระดับโพลาไรซ์ข้ามหัวของสายอากาศมีค่าประมาณ  $-24$  เดซิเบล สายอากาศที่ใช้ออกแบบด้วยแบบแผนคลื่นเป็นใหญ่ ( $TE_{10}$ ) จึงทำให้คลื่นที่ส่งไปตกกระทบมีองค์ประกอบเดียว มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น แต่คุณสมบัติการกระเจิงของเป้าทำให้คลื่นกระเจิงมีองค์ประกอบครบทั้งสองแนวโพลาไรเซชัน ดังนั้นการวัดคลื่นกระเจิงเพื่อให้ได้ข้อมูลครบ ต้องวางสายอากาศส่งและรับเป็น 4 กรณีคือ HH HV VH และ VV ดังในรูปที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.3 สายอากาศส่งและรับในระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง

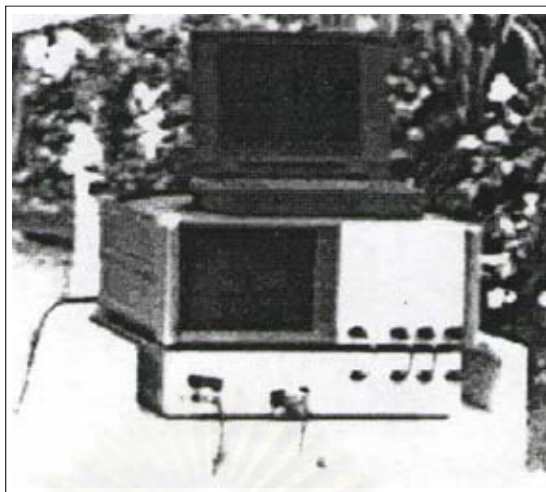


รูปที่ 3.4 การวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับทั้ง 4 กรณี

เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรและชุดทดสอบพารามิเตอร์เอส 6 GHz

เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท HEWLETT PACKARD รุ่น HP8753C ดังแสดงในรูปที่ 3.5 อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดและป้อนสัญญาณจ่ายให้แก่สายอากาศส่ง และตรวจวัดสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศรับโดยแสดงผลการวัดในรูปแบบของขนาดและภูมิภาคของสัญญาณที่ได้รับเทียบกับสัญญาณที่จ่ายออกจากเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร สำหรับชุดทดสอบพารามิเตอร์เอส รุ่น HP85047A มีฟังก์ชันคุณความถี่เป็นสองเท่า เมื่อนำมาใช้ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร จะทำให้เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรสามารถใช้ในย่านความถี่ C เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรเพียงอย่างเดียวใช้งานได้ถึง 3 GHz เท่านั้น





รูปที่ 3.5 เครื่องวัดและบันทึกผลของระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง

#### คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก

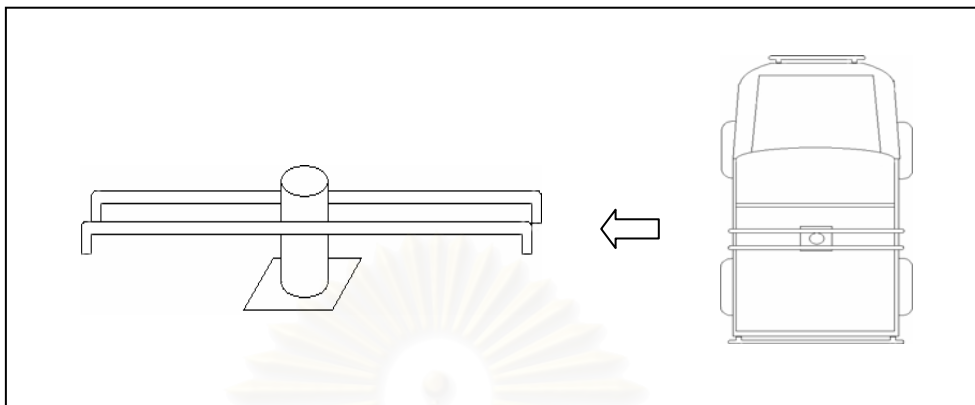
ในการเก็บข้อมูลผู้วิจัยได้ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กบันทึกข้อมูลของการวัดแต่ละครั้ง เพราะสะดวก รวดเร็ว และขนาดเล็กกะทัดรัด ขนย้ายง่าย โดยต่อเชื่อมกับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรถือบันทึกข้อมูลด้วยแผงวงจร PCMCIA-GPIB รุ่น NI-488.2 ใช้ภาษา GWBASIC สำหรับชุดคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรถือและชุดทดสอบพารามิเตอร์เอส

#### เสาจับสายอากาศและอุปกรณ์เสริมอื่นๆ

##### เสาจับสายอากาศ

เนื่องจากต้องการให้ระบบวัดเคลื่อนที่ไปตามถนนรอบแปลงทดลอง ซึ่งมีความขรุขระมาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว สามารถขนย้ายอุปกรณ์ทั้งหมดที่ประกอบวัดไปได้พร้อมกันและลดการกระทบกระเทือนในขณะเคลื่อนที่ และเพื่อความแข็งแรงและมั่นคงของการติดตั้งเสาจับสายอากาศซึ่งความสูง 3 เมตร และยังมีส่วนที่ยื่นออกไปในแนวระดับที่ระดับความสูงดังกล่าวอีก 2.5 เมตร ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากหากเกิดลมพัดแรงขณะเก็บข้อมูล จึงติดตั้งและจับยึดฐานของเสาจับสายอากาศไว้กับตัวถังรถกระบะ ฐานของเสาจับสายอากาศทำจากท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูง 50 เซนติเมตร จับวางแบบตายตัวบนตัวถังของรถกระบะ ที่ตำแหน่งบนแนวกลางของรถ ห่างจากของกระบะด้านหน้า 30 เซนติเมตร ด้วยการเชื่อมเสาจับสายอากาศต่อกับเหล็กฉากที่มีความกว้าง 1.5 นิ้ว 2 เส้น ประทับทั้งด้านหน้าและด้านหลัง และ

วางเหล็กฉากพาดตามขวางของตัวถังรถกระบะและจับยึดปลายของเหล็กฉากทั้ง 2 ด้านกับขอบของตัวถังรถกระบะ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ฐานของเสาจับสายอากาศ

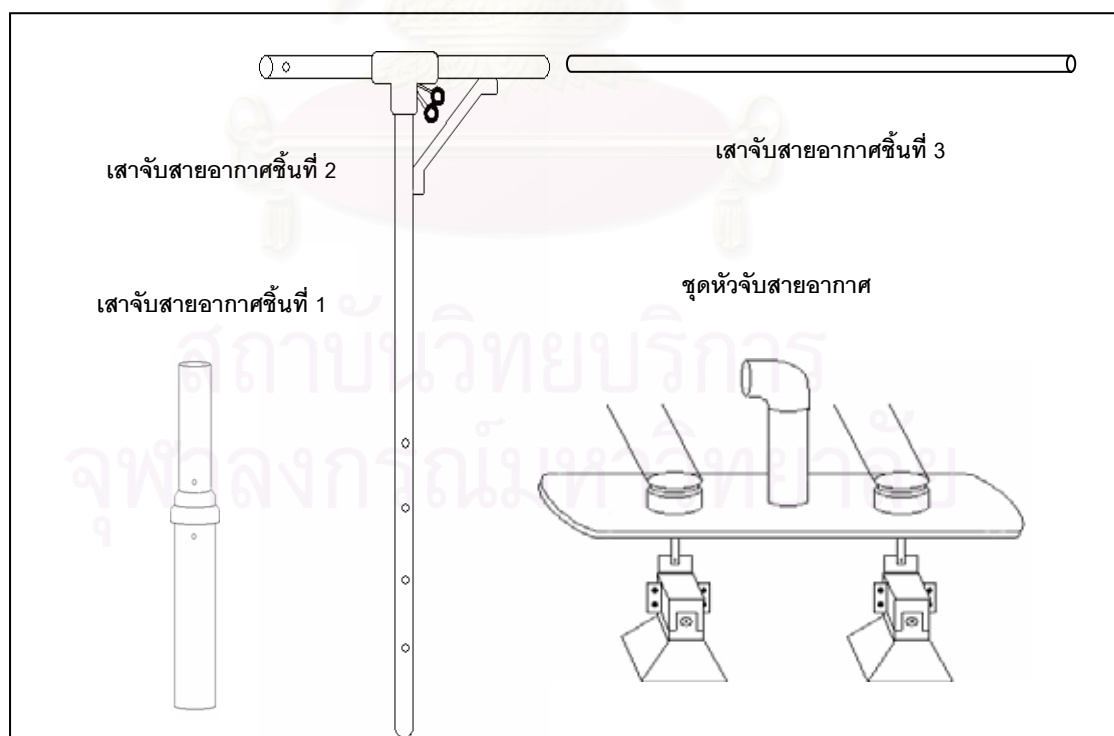
เสาจับสายอากาศประกอบด้วยเสาจับสายอากาศ 3 ชั้น และชุดหัวจับสายอากาศ 1 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เสาจับสายอากาศชั้นที่ 1 ทำจากท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ยาว 1.5 เมตร เชื่อมต่อกับท่อโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 นิ้ว ยาว 1.0 เมตร ด้วยข้อต่อลดขนาด ชั้นส่วนนี้สามารถต่อสวมเข้ากับฐานของเสาจับสายอากาศได้พอดี

เสาจับสายอากาศชั้นที่ 2 ทำจากท่อโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 3 เมตร ต่อกับข้อต่อรูปตัวที และต่อแขนทั้งสองด้วยท่อโลหะขนาดเดียวกัน ยาวออกไปข้างละ 50 เซนติเมตร ที่แขนด้านหน้าของตัวที่ต่อเชื่อมเหล็กเส้นค้ำยัน เส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว ทำมุม 45 องศา ห่างจากปลายแขนของตัวที่เข้ามา 10 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง ชั้นส่วนนี้สามารถสวมต่อเข้ากับเสาจับสายอากาศชั้นที่ 1 ได้พอดี และจับยึดด้วยนอตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว จำนวน 2 ตัว

เสาจับสายอากาศชั้นที่ 3 เป็นท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ยาว 3 เมตร ใช้สวมเข้ากับแขนของตัวที่ด้านหลังของเสาจับสายอากาศชั้นที่ 2 จับยึดกันด้วยนอตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว 1 ตัวที่ตำแหน่งห่างจากปลายแขนของตัวที่ด้านหลัง 10 เซนติเมตร

ชุดหัวจับสายอากาศ ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้จับยึดสายอากาศ 2 ชุด แต่ละชุดต่อเข้ากับเพลานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร แนวตั้ง 1 อัน แล้วนำไปติดตั้งบนแผ่นจับยึดเพลลา โดยเพลลาทั้งสองวางห่างกัน 30 เซนติเมตร เพลลาแต่ละเพลลาสามารถหมุนได้รอบตัวบนแผ่นจับยึด

เพลาดัวยระบบลูกปืนที่วางบนป่าของแผ่นจับยึดเพลาลูก เมื่อต่อสายอากาศเข้ากับเพลาลูก สายอากาศทั้งสองจะวางตัวในแนวตั้ง และอยู่ด้านล่างของแผ่นจับยึดเพลาลูก การบังคับให้สายอากาศเปลี่ยนแนวโพลาริเซชันทำโดยการหมุนเพลาลูก ซึ่งจะทำให้สายอากาศหมุนตามเพลาลูก การบังคับให้เพลาลูกหมุนทำโดยการพันเชือกไว้รอบปลายเพลาลูกด้านบนเหนือแผ่นจับยึดเพลาลูกขึ้นไปซึ่งออกแบบให้ปลายด้านบนของเพลาลูก มีลักษณะเป็นล้อยวงกลมที่วางตัวแนวระดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ที่มีขอบบ่ายื่นออกมาทั้งด้านบนและด้านล่าง เพื่อให้เชือกที่พันอยู่บนป่ารอบล้อยวงกลมเท่านั้น เมื่อดึงปลายเชือกก็จะทำให้เพลาลูกหมุน เชือกของเพลาลูกแต่ละเพลาลูกจะมี 2 เส้น เมื่อดึงเชือกแต่ละเส้นของเพลาลูกเดียวกันจะทำให้เพลาลูกหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน หากดึงเส้นแรกแล้วหมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อดึงอีกเส้นหนึ่งจะทวนเข็มนาฬิกา แล้วนำปลายเชือกแต่ละเส้นไปคล้องผ่านรอกที่อยู่ติดกับเสาจับสายอากาศชั้นที่ 2 ซึ่งอยู่ในแนวตั้งเพื่อให้ปลายเชือกลงมาอยู่ด้านล่างในแนวเดียวกับเสาจับสายอากาศ ทำให้สามารถบังคับเพลาลูกเพื่อปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันของสายอากาศจากด้านล่างเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ชุดหัวจับสายอากาศนี้จะนำไปต่อกับปลายด้านหน้าของเสาจับสายอากาศชั้นที่ 3 ซึ่งวางตัวในแนวระดับ ด้วยการต่อเชื่อมแผ่นจับยึดเพลาลูกกับท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ยาว 10 เซนติเมตรซึ่งอยู่ในแนวตั้ง จากนั้นต่อเชื่อมกับเสาจับสายอากาศชั้นที่ 3 ด้วยข้อต่ออลูมิเนียมฉาก และเมื่อประกอบเสาจับสายอากาศทั้ง 3 ชั้น และชุดหัวจับสายอากาศเข้าด้วยกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของเสาจับสายอากาศ



รูปที่ 3.8 เสาจับสายอากาศ

#### สายส่งสัญญาณ

ใช้สายส่งสัญญาณความยาว 5 เมตร 2 เส้น ที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม นำมาทดสอบการสูญเสีย พบว่ามีการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับเท่ากับ  $-22$  เดซิเบลต่อความยาว 1.8 เมตร และมีการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกเท่ากับ  $0.8$  เดซิเบลต่อเมตร

#### วัสดุที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ

ในการวัดแต่ละครั้งจะมีการปรับเทียบด้วยแผ่นสะท้อนคลื่น เพราะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นและทิศทางในการสะท้อนคลื่นที่แน่นอน โดยใช้แผ่นสะท้อนคลื่นทำด้วยสังกะสีเรียบ ขนาด  $2.4 \times 2.4$  ตารางเมตร และมีความหนา  $0.5$  มิลลิเมตร วางกับพื้นราบในแนวระดับ

#### อุปกรณ์ป้องกันฝนและแดด

อุปกรณ์นี้ใช้ร่มผ้าใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2.4$  เมตร เพื่อป้องกันฝนและแสงแดด โดยถูกจัดวางที่ด้านท้ายบนตัวถังของรถกระบะ เมื่อกางร่มออกในช่วงเวลาเที่ยงและบ่ายก็จะให้ร่มเงาแก่เครื่องมือวัดและผู้ปฏิบัติงานได้เพียงพอ

## พืชไร่ที่ติดตามการเจริญเติบโตในวิทยานิพนธ์นี้

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ ซึ่งเป็นการแยกประเภทเป้าที่เป็นชนิดเดียวกันแต่ต่างสถานะกันตามอายุของพืชไร่ โดยสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ที่เปลี่ยนไปจะทำให้สมบัติของพืชไร่เปลี่ยนไปทั้งภายนอกและภายใน สมบัติภายนอกที่เปลี่ยนไป ได้แก่ ขนาดและรูปร่าง เช่นมีความสูงมากขึ้น ลักษณะทรงพุ่ม ขนาดของใบใหญ่ขึ้นและจำนวนของใบมากขึ้น มีดอกเกิดขึ้น เป็นต้น สมบัติภายในที่เปลี่ยนไป เช่น ความชื้นของพืชไร่ลดลง ลักษณะของเนื้อเยื่อมีการดูดซึมน้ำและสะสมแร่ธาตุต่างไปจากเดิม เป็นต้น การเปลี่ยนไปของสมบัติทั้งภายนอกและภายในย่อมส่งผลกระทบต่อสมบัติการกระเจิงคลื่นของพืชไร่เปลี่ยนไป การวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงจากพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ ย่อมแสดงสมบัติโพลาไรเซชันของพืชไร่ที่สถานะนั้นออกมา ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์แยกสถานะการเจริญเติบโตเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ต่อไป และเพื่อยืนยันความถูกต้องของแนวคิดที่จะนำเสนอ จึงทดลองกับพืชไร่ 3 ชนิดที่แตกต่างกัน วิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักในการเลือกพืชไร่เพื่อใช้ ติดตามการเจริญเติบโตดังนี้

1. พืชทั้ง 3 ชนิดต้องมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์แตกต่างกันอย่างชัดเจน
2. ใช้เวลาติดตามการเจริญเติบโตตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงเก็บเกี่ยวใกล้เคียงกันและไม่นานนัก โดยเลือกพืชไร่ที่ใช้เวลาประมาณ 90-110 วัน เพื่อความสะดวกในการวัดเก็บข้อมูล เนื่องจากหากใช้เวลานานกว่านี้จะไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมให้มีค่าใกล้เคียงกันทุกครั้งที่วัดเก็บข้อมูลได้ เพราะฤดูกาลเปลี่ยนไป สภาพภูมิอากาศย่อมเปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลให้ค่าที่วัดได้จากระบบวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงผิดพลาดไป
3. สามารถปลูกได้ในฤดูแล้งเพื่อให้สามารถควบคุมความชื้นของดินให้มีค่าใกล้เคียงกัน และเพื่อความปลอดภัยของเครื่องมือวัด และความสะดวกในการเคลื่อนย้ายตำแหน่งขณะวัดเก็บข้อมูล
4. เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ

จากหลักการที่กล่าวมาจึงเลือกใช้ถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวานเป็นเป้าของการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ เนื่องจากพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะทางกายภาพและวงจรชีวิตที่ต่างกันอย่างชัดเจน ถั่วลิสงเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ ใบมีขนาดเล็กจำนวนมาก ลำต้นมีลักษณะเป็นทรงพุ่มลักษณะคลุมดิน มีความสูงเมื่อโตเต็มที่ประมาณ 50-60 เซนติเมตร และความสูงเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ทานตะวันเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีลำต้นตั้งตรง มีใบขนาดใหญ่ ปลายใบและขอบใบเป็นรอยหยัก มีดอกขนาดใหญ่ที่ปลายต้น มีลักษณะการเจริญเติบโตทางความสูงของลำต้นเป็นกรวยรูป



เอส และเมื่อโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 150-180 เซนติเมตร ข้าวโพดหวานเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ในตระกูลหญ้า ใบประกอบด้วยกาบใบหุ้มลำต้น และแผ่นใบที่แผ่กางออกมีลักษณะเรียวยาว ลักษณะการเจริญเติบโตทางความสูงและความสูงเมื่อโตเต็มที่ใกล้เคียงกับทานตะวัน และพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดนี้ยังเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดและลักษณะทางพฤกษศาสตร์ดังนี้

### ถั่วลิสง

ถั่วลิสง (groundnut, peanut) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Arachis hypogaea* L. เป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนและกึ่งร้อน เป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของไทย เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง คือเป็นแหล่งโปรตีนและไขมัน ถั่วลิสงจัดเป็นพืชน้ำมัน เพราะในเมล็ดแห้งประกอบด้วยน้ำมันร้อยละ 45-55 และโปรตีนร้อยละ 25-26 ดอกสีเหลือง ออกดอกเมื่ออายุประมาณ 28 วัน เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 95-110 วัน ความสูงประมาณ 55-60 เซนติเมตร สามารถปลูกได้ 2 ช่วงคือฤดูฝนเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน และฤดูแล้งเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ทั่วไป [14 และ 15] ดังนี้

-ราก ถั่วลิสงมีระบบรากแบบรากแก้ว และมีรากแขนงแตกออกมาจากรากแก้ว นอกจากนี้ยังมีรากที่แตกจากข้อของลำต้นที่เลื้อยบนผิวดิน ที่รากแก้วและรากแขนงพบปมขนาดเล็กสีน้ำตาลอยู่ทั่วไปเกิดจากแบคทีเรียไรโซเบียมเข้าไปอาศัยอยู่แบบพึ่งพาอาศัยกันและกันกับรากของถั่วลิสง แบคทีเรียนี้สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศมาสะสมไว้และพืชนำมาใช้ในรูปของสารประกอบไนเตรต

-ลำต้น ถั่วลิสงเป็นพืชล้มลุกพวกไม้เนื้ออ่อน ลำต้นมีความสูง 50-60 เซนติเมตร การเจริญเติบโตของลำต้นเป็นแบบลำต้นเลื้อย มีลำต้นสั้น กิ่งก้านที่แตกออกมามักเจริญไปในแนวนอนทอดไปตามผิวดิน ฝักเกิดกระจัดกระจายอยู่ตามกิ่งก้านที่เลื้อยไปตามผิวดิน บริเวณมุมใบเลี้ยงและมุมใบของข้อที่อยู่ถัดขึ้นไปเป็นที่เกิดของกิ่งแขนง ที่มุมใบและกิ่งแขนงอาจเกิดกิ่งย่อยที่เกิดดอก

-ใบ ใบของถั่วลิสงเป็นใบประกอบ แต่ละใบมีใบย่อย 2 คู่ ใบเกิดสลับกันบนข้อของลำต้น ใบย่อยมีลักษณะเป็นรูปไข่ ขอบใบเรียบ ก้านใบยาว 3-7 เซนติเมตร ที่โคนก้านใบมีหูใบ 2 อันมีลักษณะแหลมและยาวประมาณ 2 เซนติเมตร

-ดอก ถั่วลิสงมีดอกเกิดเป็นกลุ่มหรือช่อ ช่อละ 2-5 ดอก ดอกมีสีเหลือง เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9-1.4 เซนติเมตร ก้านดอกสั้น ถั่วลิสงเป็นพืชผสมตัวเอง การผสมเกสรเกิดขึ้นก่อนดอกจะบาน



เมื่อได้รับการผสมเกสรแล้วฐานของรังไข่จะยึดตัวเป็นก้านยาวเรียกว่าเข็ม ซึ่งจะปรากฏให้เห็น 5-7 วันหลังดอกบาน ส่งรังไข่ซึ่งอยู่ปลายเข็มลงใต้ผิวดินลึก 3-5 เซนติเมตร แล้วเจริญเป็นฝัก

-ผลและเมล็ด ผลหรือฝักอาจเกิดเดี่ยวๆ หรือเกิดเป็นกลุ่มตามมุมใบ เมื่อฝักแก่เปลือกฝักจะแข็งและเปราะ มีลายเส้นที่เปลือก ฝักมีสีขาวนวลหรือสีน้ำตาลอ่อน มี 1-4 เมล็ดต่อฝัก เมล็ดถั่วลิสงมีเปลือกหุ้มเมล็ดบาง ถัดเข้าไปเป็นใบเลี้ยงหนา 2 ใบประกบติดกัน ทำหน้าที่เก็บสะสมอาหารพวกไขมัน โปรตีน และสารอื่นๆ

### ทานตะวัน

ทานตะวัน (sunflower) ที่ใช้ปลูกสกัดน้ำมันมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus annus L.* เป็นไม้ล้มลุก เป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกา ปัจจุบันการผลิตยังไม่เพียงพอับความต้องการภายในประเทศเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืช และเป็นพืชที่รัฐบาลให้การส่งเสริมการปลูก จึงนับได้ว่าเป็นพืชที่มีอนาคตสดใสชนิดหนึ่ง ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้พันธุ์ซาราทอพลกิล มีอายุประมาณ 95-110 วัน มีความสูงประมาณ 150 เซนติเมตร อายุเมื่อออกดอก 50-60 วัน ดอกย่อยผสมทั้งหมดเมื่ออายุ 70-75 วัน ในเขตเกษตรกรอาศัยน้ำฝนจะปลูกช่วงเดือนสิงหาคมถึงตุลาคม ในพื้นที่ชลประทานสามารถปลูกได้ทุกเดือน มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ทั่วไป [14 และ 16] ดังนี้

-ราก ทานตะวันมีระบบรากแบบรากแก้ว โดยมีรากแก้วออกมาก่อน ต่อมาจะมีรากแขนงแตกออกจากรากแก้ว รากแก้วสามารถหยั่งลึกได้ถึง 150-270 เซนติเมตร ส่วนรากแขนงจะเจริญได้ดีในระดับผิวดินลึก 10-30 เซนติเมตรและแผ่ไปตามแนวนอนเป็นบริเวณกว้าง 60-150 เซนติเมตร

-ลำต้น ทานตะวันมีลำต้นตั้งตรง เป็นไม้เนื้ออ่อน มีขนปกคลุมอยู่ทั่วไป ในระยะแรกลำต้นจะอวบน้ำ เปราะและหักง่าย เมื่ออายุมากขึ้นลำต้นจะแข็งแรงขึ้นตามลำดับ มีความสูงระหว่าง 1.5-2.0 เมตร เมื่อทานตะวันมีใบจริง 2-3 คู่ จะมีความสูง 10-15 เซนติเมตร

-ใบ เมื่อทานตะวันงอกโผล่พ้นผิวดินจะเห็นใบเลี้ยงซึ่งมีลักษณะกลมยาว เมื่อใบเลี้ยงเติบโตเต็มที่ จะขยายแผ่กว้างออก ระยะเวลาจะเห็นใบจริงคู่แรกอยู่ตรงส่วนยอดซึ่งเมื่อแผ่ขยายเต็มที่ จะมีรูปร่างเรียวยาว และมีขนปกคลุม ใบจริง 5 คู่แรกเกิดตรงกันข้าม โดยคู่ที่อยู่ถัดขึ้นมาจะทำมุม 90 องศากับคู่ที่เกิดก่อน ส่วนใบที่เกิดต่อจากนั้นเกิดเรียงเป็นใบเดี่ยวเวียนรอบลำต้น มีขนหยาบปกคลุมทั่วไป

-ดอก ช่อดอกเป็นแบบ capitulum ในช่อดอกประกอบด้วย ray flower และ disk flower จำนวนมากอยู่บนฐานรองดอก ด้านนอกของฐานรองดอกมีใบประดับขนาดใหญ่และปลายแหลม 2 ชั้น ray flower เกิดเรียงบริเวณขอบนอกของช่อดอก มีกลีบดอกเชื่อมเป็นแผ่นเดียวกัน มีขนาด

ใหญ่และยาวมีสีต่างๆ เช่น เหลืองทอง หรือเหลืองส้ม ไม่มีเกสรตัวผู้และเป็นหมัน disk flower มีจำนวนมากอยู่เป็นวงถัดจาก ray flower เข้าไปจนถึงกลางช่อดอก เป็นดอกสมบูรณ์เพศและจะได้รับการผสมต่อไป

-ผลและเมล็ด เมล็ดเป็นแบบ achene แต่ละผลมี 1 เมล็ด ซึ่งประกอบด้วยเปลือกเมล็ด เอ็นโดสเปิร์มและคัพพะ เมล็ดมีความกว้าง 4-13 มิลลิเมตร ยาว 7-25 มิลลิเมตรน้ำหนัก 1,000 เมล็ด 40-60 กรัม

### ข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดหวาน (sweet corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays L.* เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่จัดอยู่ในพืชตระกูลหญ้า มีถิ่นกำเนิดในอเมริกากลาง จัดเป็นพืชที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจอย่างยิ่ง ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้พันธุ์ไทย ซูเปอร์สวีต คอมโพสิต 1 ดี เอ็ม อาร์ ซึ่งมีอายุการเก็บเกี่ยวฝักแก่ 95-105 วัน ความสูงเฉลี่ย 170 เซนติเมตร ความสูงของตำแหน่งฝัก 75 เซนติเมตร ฝักมี 1-2 ฝักต่อต้น ดอกตัวผู้บานประมาณ 50% เมื่ออายุ 40 วัน มีไหมเฝือก 50% เมื่ออายุ 45 วัน ปลูกได้ตลอดทั้งปี แต่เหมาะสมในช่วงเดือนตุลาคมถึงกุมภาพันธ์ มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ทั่วไป [14 และ 17] ดังนี้

-ราก ข้าวโพดมีระบบรากแบบรากฝอย ซึ่งเจริญมาจาก 2 ส่วน คือ รากที่เจริญมาจากคัพพะ ซึ่งมีการพัฒนามาจากเรติเคิล และมีรากแขนงแตกออกมา รากทั้งหมดนี้มีการเจริญเติบโตในระยะสั้นขณะข้าวโพดเป็นต้นกล้า และจะตายไปเมื่อข้าวโพดโตขึ้น รากส่วนที่สอง คือรากที่เจริญมาจากลำต้น มีจุดกำเนิดที่ข้อส่วนล่างของลำต้น รากเหล่านี้จะเจริญเติบโตอยู่ตลอดชีวิตของข้าวโพด สามารถเจริญแผ่กระจายรอบลำต้น มีรัศมีประมาณ 1 เมตร หยั่งลึกลงไปใต้ดินได้ถึงประมาณ 2 เมตร

-ลำต้น ลำต้นประกอบด้วยข้อและปล้อง บริเวณข้อมีเนื้อเยื่อเจริญ จุดกำเนิดราก ตา และรอยกาบใบ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น 2.5-5.0 เซนติเมตร สำหรับพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทยจะสูงไม่เกิน 3 เมตร

-ใบ ใบประกอบด้วยกาบใบและแผ่นใบ กาบใบจะหุ้มลำต้น ส่วนแผ่นใบแผ่กางออก มีเส้นกลางใบข้าวโพดที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์ให้ทนต่ออัตราการปลูกสูง มักมีลักษณะใบตั้ง แผ่นใบด้านบนมีขนเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง ส่วนแผ่นใบด้านล่างจะเรียบ และมีปากใบจำนวนมาก

-ดอก ข้าวโพดมีช่อดอกตัวผู้และช่อดอกตัวเมียอยู่บนต้นเดียวกัน แต่แยกอยู่ต่างตำแหน่งกัน โดยช่อดอกตัวผู้ที่อยู่ส่วนยอดของลำต้น มีแกนกลางช่อดอกและมีกิ่งแขนงแตกออกจากก้านนี้

ออกไปอีก ส่วนช่อดอกตัวเมียหรือฝักจะเกิดที่มุมใบข้อที่ 6 นับจากใบธงลงมา การพัฒนาของช่อดอกเริ่มขึ้นเมื่อข้าวโพดมีอายุ 40-45 วันหลังงอก ก้านฝักหรือก้านช่อดอกถูกหุ้มด้วยกาบใบ หรือเปลือกหุ้มฝัก กลุ่มดอกตัวเมียเกิดเป็นคู่เรียงกันเป็นแถวยาวบนแกนกลางช่อดอกหรือซัง ก้านเกสรตัวเมื่อยาว 10-30 เซนติเมตรเรียกว่าไหม ไหมแต่ละเส้นจะมีขนที่สามารถรับละอองเกสรตัวผู้ได้ตลอดความยาว เส้นไหมบริเวณโคนฝักจะเกิดขึ้นก่อน ตามด้วยส่วนกลางฝัก แต่เส้นไหมบริเวณกลางฝักจะยึดตัวโผล่พ้นกาบหุ้มฝักก่อนจึงได้รับการผสมก่อน ทำให้เมล็ดบริเวณกลางฝักมีความสมบูรณ์และขนาดใหญ่กว่าบริเวณโคนและปลายฝัก ไหมจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและแห้งเหี่ยวเมื่อดอกได้รับการผสม

-ผลและเมล็ด ผลมีเยื่อหุ้มผลติดอยู่กับส่วนเยื่อหุ้มเมล็ด มีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ ใสไม่มีสีเขียว เยื่อหุ้มผลและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวโพดจะสะสมแป้งไว้ในส่วนของเอ็นโดสเปิร์ม การสะสมแป้งจะสิ้นสุดเมื่อข้าวโพดเจริญเติบโตถึงระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา โดยจะปรากฏแผ่นเยื่อสีดำหรือน้ำตาลดำที่บริเวณโคนของเมล็ด

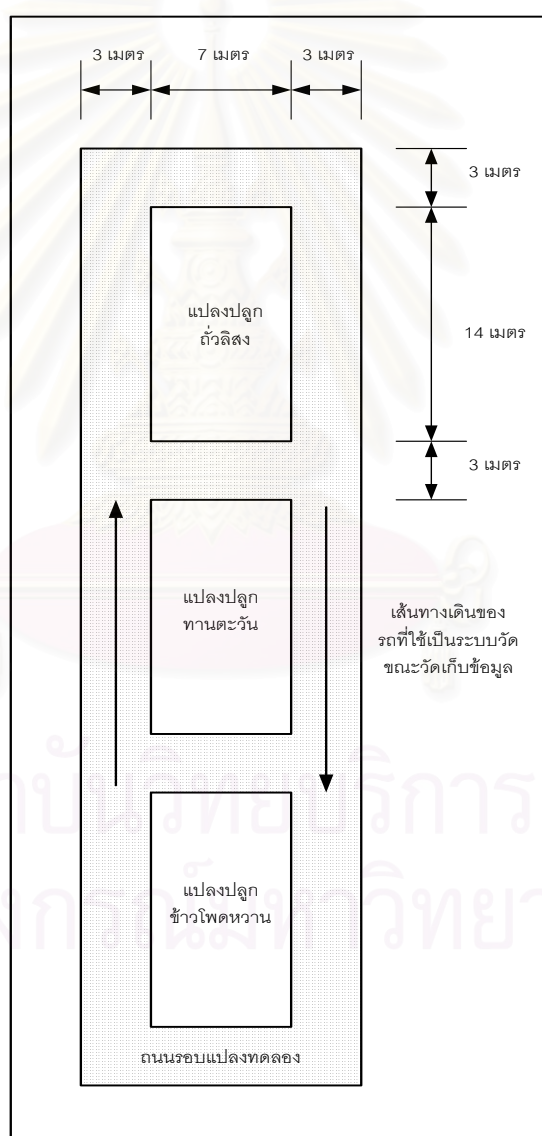
### รายละเอียดการทดลองและการวัดเก็บข้อมูล

วิทยานิพนธ์นี้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่จากแปลงทดลอง เพราะต้องการควบคุมปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยปลูกพืชไร่ตามกรรมวิธีที่ถูกต้อง [14] ในแปลงทดลองที่มีขนาดเพียงพอต่อการวัดเก็บข้อมูล และอยู่ในความควบคุมของผู้เชี่ยวชาญทางด้านเกษตรกรรม โดยขอใช้พื้นที่ของวิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรีเพื่อปลูกพืชไร่และทำงานวิจัยในภาคสนาม โดยเลือกปลูกพืชไร่และวัดเก็บข้อมูลเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ในตั้งแต่ต้นเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม เพื่อต้องการควบคุมปัจจัยของสิ่งแวดล้อมอันได้แก่ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นของอากาศ และความชื้นของดินให้มีใกล้เคียงกัน โดยสามารถแบ่งรายละเอียดของการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ 1. แปลงทดลอง การปลูก และการดูแลรักษาพืชไร่ 2. แผนการวัดเก็บข้อมูล 3. ขั้นตอนในการวัดเก็บข้อมูล และ 4. ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในการวัดเก็บข้อมูล

## แปลงทดลอง การปลูก และการดูแลรักษาแปลงทดลอง

### แปลงทดลอง

แปลงทดลองเป็นแปลงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 3 แปลง แต่ละแปลงมีขนาดกว้าง 7 เมตร และยาว 14 เมตร เรียงต่อกันตามยาว เว้นระยะห่างระหว่างแปลง 3 เมตร โดยปลูกพืชไร่แปลงละชนิด ได้แก่ ถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวาน ตามลำดับ รอบแปลงทำเป็นถนนขนาดกว้าง 3 เมตร เพื่อเป็นเส้นทางเดินของรถกระบะซึ่งเป็นส่วนประกอบของระบบวัดขณะวัดเก็บข้อมูล แสดงในรูปที่ 3.9



ก. แปลงทดลองที่ออกแบบไว้  
รูปที่ 3.9 แปลงทดลอง



ข. แปลงทดลองที่จริงสร้างขึ้นมาเพื่อปลูกพืชไร่  
รูปที่ 3.9 แปลงทดลอง (ต่อ)

#### การเตรียมแปลง

การเตรียมแปลงก่อนปลูกพืชไร่ประกอบด้วย การไถ 1 ครั้ง และพรวน 2 ครั้ง เมื่อดินร่วนซุยพอสมควรรองพื้นด้วยปุ๋ยสูตร 15-15-15 ในอัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ จากนั้นยกร่องตามแนวยาว ระยะห่างระหว่างสันร่องประมาณ 1 เมตร ความกว้างท้องร่องประมาณ 30 เซนติเมตร ความสูงของสันร่องประมาณ 20 เซนติเมตร

#### การปลูก

การปลูกเลือกใช้การปลูกด้วยเครื่องหยอดเมล็ด โดยหยอดหลุมละ 2 เมล็ด ปลูกพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดเป็นแถวตามแนวที่ยกร่องไว้ โดยปลูกระหว่างท้องร่องทั้ง 2 ฝั่ง และมีระยะห่างระหว่างหลุม 25 เซนติเมตร โดยแถวที่อยู่ติดกันแต่ละหลุมจะปลูกแบบสลับฟันปลา

#### การให้น้ำ

การให้น้ำแต่ละแปลงทำโดยการปล่อยน้ำไปตามท้องร่อง ปริมาณมากน้อยต่างกัน โดยพิจารณาจากความต้องการของพืชที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ สภาพดินฟ้าอากาศ และปริมาณน้ำฝนที่ตกในช่วงเวลานั้นๆ แต่ก่อนวันที่จะวัดเก็บข้อมูล 1 วันจะรดให้น้ำเพื่อใช้ความชื้นของดินและการได้รับน้ำของพืชในแต่ละครั้งใกล้เคียงกัน



## การกำจัดวัชพืชและการป้องกันแมลง

เมื่อมีโรคหรือแมลงระบาดพิจารณาใช้สารเคมีป้องกันและกำจัดตามความจำเป็น ส่วนการกำจัดวัชพืช ก่อนปลูกฉีดยาพ่นคลุมวัชพืช 1 ครั้ง หลังจากพืชงอกแล้วกำจัดวัชพืชด้วยการถอนทุกสัปดาห์

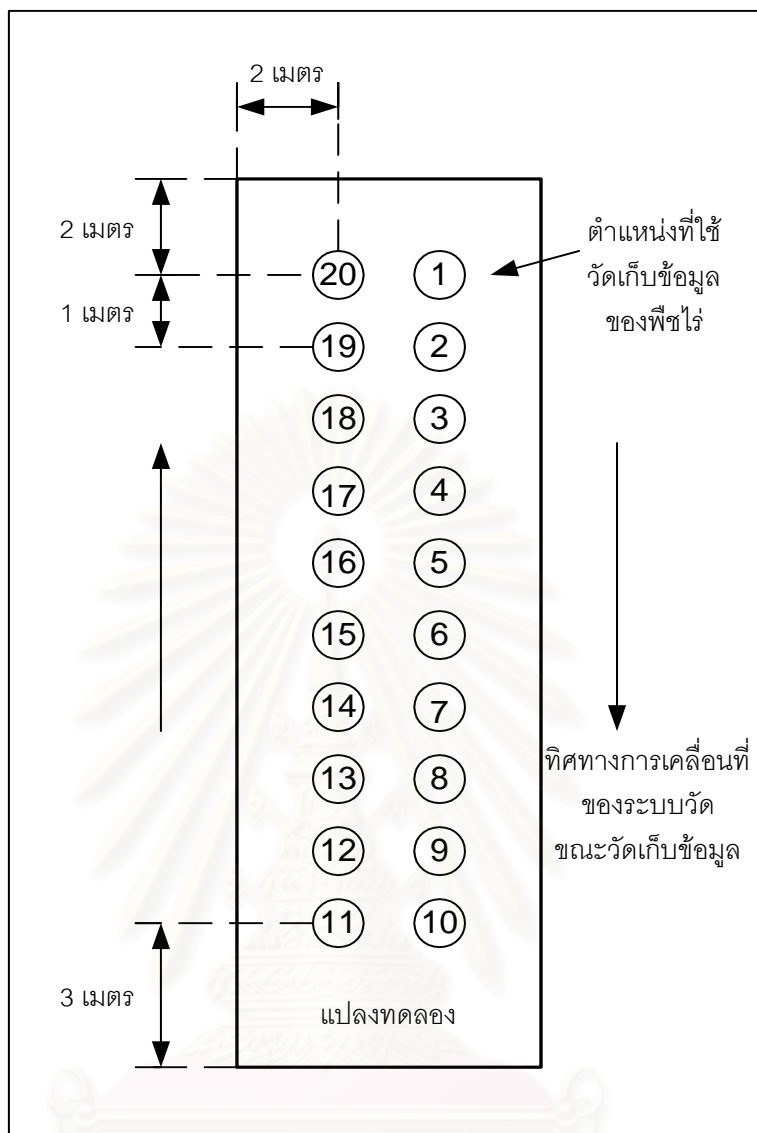
### แผนการวัดเก็บข้อมูล

การวัดเก็บข้อมูลเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ประกอบด้วยส่วนต่างๆ 2 ส่วนคือ 1. การวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง และ 2. การวัดเก็บข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ของพืชไร่ จากการศึกษาวงจรชีวิตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด พบว่าต้องมีจำนวนครั้งและระยะเวลาในการวัดเก็บข้อมูลเหมาะสมจึงจะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสถานะของพืชไร่ได้ชัดเจนและครบถ้วน จากผลการศึกษาสรีรวิทยาของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด ทำให้วางแผนการวัดเก็บข้อมูลพืชไร่แต่ละชนิดทั้งหมด 7 ครั้ง ครั้งแรกวัดหลังจากเริ่มไถพรวนดินประมาณ 1 สัปดาห์ และครั้งถัดไปวัดเก็บข้อมูลทุก 2 สัปดาห์ เพราะหากวัดเก็บข้อมูลถี่กว่านี้ก็จะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนและยากต่อการพิจารณา ข้อมูลจากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง แต่ถ้าช่วงเวลาในการวัดเก็บข้อมูลห่างกันมากกว่านี้จะทำให้ขาดข้อมูลของสถานะการเจริญเติบโตที่สำคัญบางช่วงไป การวัดเก็บข้อมูลทุกครั้งพยายามวัดสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน คือช่วงเวลาในแต่ละวันเดียวกัน อุณหภูมิใกล้เคียงกัน ความชื้นของดินและอากาศใกล้เคียงกัน เพื่อจำกัดตัวแปรที่จะส่งผลกระทบต่อ การวัด โดยในการวัดเก็บข้อมูลแต่ละครั้งมีรายละเอียดดังนี้

### การวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

ผู้วิจัยได้วัดคลื่นกระเจิงกลับจากพืชไร่ด้วยระบบวัดที่สร้างขึ้นมา โดยใช้ความถี่ 3,400-4,800 MHz วัดเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 8 ความถี่ แต่ละความถี่ห่างกัน 200 MHz ค่าที่บันทึกผลแต่ละครั้งเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 10 ครั้งที่ตำแหน่งเดียวกัน วัดพืชไร่ที่ละชนิด ชนิดละ 20 ตำแหน่ง ในแต่ละตำแหน่งต้องวัดทั้ง 4 กรณี ได้แก่ HH HV VH และ VV โดยแต่ละตำแหน่งอยู่เรียงกันไปตามแนวยาวของแปลงทดลองทั้ง 2 ฝั่ง ฝั่งละ 10 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในการวัดแต่ละครั้งเริ่มวัดจากถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวานเรียงตามลำดับ





รูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ใช้วัดเก็บข้อมูลในแปลงทดลอง

### การวัดเก็บข้อมูลทางพฤกษศาสตร์

การวัดเก็บข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ทุกครั้งจะพยายามทำในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน คือช่วงเวลาในแต่ละวันเป็นช่วงเดียวกัน อุณหภูมิใกล้เคียงกัน ความชื้นของดินและอากาศใกล้เคียงกันเพื่อจำกัดตัวแปรที่จะส่งผลกระทบต่อกรวัด การวัดเก็บข้อมูลทางพฤกษศาสตร์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของพีชไร้ ข้อมูลมี 2 ส่วนคือ 1. ข้อมูลการเจริญเติบโตทางลำต้น และ 2. ข้อมูลการเจริญเติบโตทางการเจริญพันธุ์ ข้อมูลการเจริญเติบโตทางลำต้นได้แก่ ความสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น ลักษณะรูปร่างและขนาดของทรงพุ่ม จำนวนกิ่งและใบของพีชไร้ และน้ำหนักรวมของพีชไร้แต่ละต้น ข้อมูลการเจริญเติบโตทางการเจริญพันธุ์ จะแตกต่างกันไป

ตามชนิดของพืชไร่ เช่น ถั่วลิสงพิจารณาการออกดอก การแทงซั่ม และการเจริญเติบโตของฝัก ทานตะวันพิจารณาการเจริญเติบโตของดอก ข้าวโพดพิจารณาจากการออกดอก การติดฝัก และการเปลี่ยนแปลงของไหมและการเจริญเติบโตของฝัก เป็นต้น

### ขั้นตอนในการวัดเก็บข้อมูล

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการวัดแล้วนำไปวางเรียงบนรถกระบะ เตรียมพร้อมสำหรับการเดินทาง โดยรถคันที่ใช้ในการเดินทางนี้เป็นส่วนหนึ่งของระบบวัดที่สร้างขึ้น มาเพื่อใช้วัดเก็บข้อมูลด้วย      เดินทางไปยังแปลงทดลองซึ่งอยู่ภายในวิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี  ขนอุปกรณ์ต่างๆ ลงจากรถ ประกอบเสาจับสายอากาศ และจัดอุปกรณ์ต่างๆ เตรียมพร้อมสำหรับการวัด ต่อสายไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้าปกติมายังรถเพื่อจ่ายพลังงาน ให้แก่ระบบวัดดังแสดงในรูปที่3.11
2. ปรับเทียบระดับสัญญาณด้วยแผ่นสังกะสีเรียบขนาด 2.4×2.4 ตารางเมตร ที่วางบนพื้นดิน
3. วัดคลื่นกระเจิงกลับจากพืชไร่ด้วยระบบวัดที่สร้างขึ้น มา โดยวัดพืชไร่ทีละชนิด ชนิดละ 20 ตำแหน่ง ในแต่ละตำแหน่งต้องวัดทั้ง 4 กรณี คือ HH HV VH และ VV บันทึกผลด้วย คอมพิวเตอร์ โดยแต่ละตำแหน่งอยู่เรียงกันไปตามแนวยาวของแปลงทดลองทั้ง 2 ฝั่ง ฝั่งละ10 ตำแหน่ง ในการวัดแต่ละครั้งเริ่มวัดจากถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวานเรียงตามลำดับ
4. เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชไร่ทางพฤกษศาสตร์



รูปที่ 3.11 ระบบวัดโพลาไรเซชันขณะวัดเก็บข้อมูล

## ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในการวัดเก็บข้อมูล

ปัญหาและอุปสรรคที่พบส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นปัญหาทางเทคนิคของระบบวัดที่พัฒนาขึ้น แต่เป็นปัญหาที่เกิดจากสภาพแวดล้อมขณะทำการวัดอันได้แก่

-เวลาที่ใช้ในการวัดเก็บข้อมูลแต่ละชนิดยาวนาน เนื่องจากตำแหน่งแต่ละจุดที่เก็บข้อมูล ต้องเปลี่ยนโพลาริเซชันสายอากาศ 4 ครั้ง และแต่ละชนิดมี 20 ตำแหน่ง การวัดแต่ละครั้ง วันแรก ช่วงเช้าวัดเก็บข้อมูลของถั่วลิสง ช่วงบ่ายวัดเก็บข้อมูลของข้าวโพด วันที่ 2 วัดเก็บข้อมูลของทานตะวัน จึงทำให้สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และความชื้นต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าที่วัดได้

-ความร้อนจากแสงแดดในช่วงเวลาที่วัดสูงมาก เนื่องจากจุดที่วัดเป็นบริเวณโล่งแจ้ง ช่วงเวลากลางวันมีอุณหภูมิสูงกว่า 42 องศาเซลเซียส แม้จะได้ร่มเงาจากร่มแต่ก็เป็นอุปสรรคอย่างมากต่อการทดลอง

-ลม ในบางครั้งมีลมพัดแรงจนทำให้ต้องหยุดการวัดรอให้สภาพอากาศกลับมาเป็นปกติ จึงสามารถวัดต่อได้ และต้องจับยึดอุปกรณ์ทุกอย่างไว้เป็นอย่างดีเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

-ฝน ในการวัดแต่ละครั้งต้องระมัดระวังปัญหาเรื่องฝนเป็นอย่างมาก ถ้าฝนตกก่อนวันที่ต้องมีการวัด จะทำให้ดินมีความชื้นสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าที่วัดได้ จึงต้องเลื่อนการวัดออกไปเพื่อรอให้ดินมีความชื้นปกติใกล้เคียงกับทุกครั้งที่มีการวัด และหากเกิดฝนตกในขณะที่มีการวัดย่อมส่งผลกระทบต่อการวัดและอาจทำให้เครื่องมือวัดเกิดความเสียหายได้ แต่ตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้ไม่มีฝนตกขณะวัดเก็บข้อมูล มีฝนหลงฤดูตกบ้างในวันที่ไม่ได้วัดเก็บข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการวัดเก็บข้อมูล

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้ติดตามการเจริญเติบโตของถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวาน พร้อมทั้งได้แสดงขั้นตอนในการดำเนินการวัด ผลการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงที่ได้คือขนาดกำลังและภูมิภาคของคลื่นกระเจิงกลับเทียบกับคลื่นที่ส่ง ซึ่งมีทั้งหมด 4 กรณี คือ HH HV VH และ VV แต่ละกรณีเก็บ ข้อมูล 20 ตำแหน่งต่อการวัดเก็บข้อมูล 1 ครั้ง การติดตามการเจริญเติบโตของพืชตั้งแต่เริ่มปลูกจนเก็บเกี่ยวต้องมีการวัดเก็บข้อมูลทั้งหมด 7 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 2 สัปดาห์

บทนี้จะกล่าวถึงผลการวัดเก็บข้อมูลทั้งหมดจากพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ผลการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง ซึ่งจะแสดงในรูปขององค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงอันเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานเพื่อใช้อธิบายสมบัติของเป้าหมายและหาค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ต่อไปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และส่วนที่ 2 ผลการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ทางด้านทางพฤกษศาสตร์

### ผลการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

ระบบวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงที่พัฒนาขึ้นจะส่งและรับคลื่นกระเจิงกลับด้วยเครื่องวิเคราะห์ขั้ววงจรร่วมกับชุดทดสอบพารามิเตอร์เอสทีความถี่ 3.4 ถึง 4.8 จิกะเฮิรตซ์ โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนแนวโพลาริเซชันของสายอากาศรับและส่งก็จะสามารถวัดคลื่นกระเจิงกลับครบทั้ง 4 กรณี ซึ่งข้อมูลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ขั้ววงจรถือขนาดกำลังของคลื่นกระเจิงที่รับได้ (หน่วยเป็นเดซิเบล) และภูมิภาค (หน่วยเป็นองศา) และบันทึกลงเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้โปรแกรมภาษา GWBASIC ควบคุมการทำงาน

### การปรับเทียบก่อนวัดเก็บข้อมูล

ก่อนการวัดเก็บข้อมูลทุกครั้งผู้วิจัยจะวัดปรับเทียบด้วยแผ่นสังกะสีเรียบ ขนาด 2.4×2.4 ตารางเมตร ดังนั้นข้อมูลที่บันทึกลงคอมพิวเตอร์จึงเป็นค่าสัดส่วนของกำลังคลื่นที่กระเจิงกลับจากพืชไร่ต่อคลื่นที่กระเจิงกลับจากแผ่นสะท้อน โดยมีเหตุผลที่เลือกการปรับเทียบด้วยวิธีนี้ดังนี้

1. การวัดแต่ละครั้งย่อมมีสัญญาณรบกวนจากภายในระบบวัดและสิ่งแวดล้อมอันได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นของดิน และอากาศ และ สัญญาณแปลกปลอมในอากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง ตัดผลของสัญญาณรบกวนเหล่านั้นด้วยการปรับเทียบกับค่ามาตรฐาน [18] สำหรับระบบวัด โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงในวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการกระเจิงของคลื่นจากพีซีไร โดย ใช้ สายอากาศปากแตรที่มีรายละเอียดดังที่กล่าวมาในบทที่ 3 รับและส่งคลื่น สายอากาศวางอยู่ที่ ตำแหน่งสูงจากพื้น 3 เมตร แผ่นสะท้อนที่เลือกมาใช้ในการปรับเทียบต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอ เพราะถ้าหากเล็กไปก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการปรับเทียบลดลง สาเหตุที่ใช้แผ่นสังกะสีเรียบ เป็นแผ่นมาตรฐานในการปรับเทียบเพราะคลื่นสะท้อนจากแผ่นสังกะสีเรียบมีทิศทางและขนาดที่ แน่นนอน สามารถคำนวณได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้แผ่นสังกะสีเป็นแผ่นโลหะที่ ไม่เป็นสนิม มีความคงทนแข็งแรง และราคาถูก จึงใช้แผ่นสังกะสีเรียบเพื่อตัดผลของสัญญาณ รบกวนและใช้อ้างอิงค่าของคลื่นกระเจิงกลับจากพีซีไรได้

2. การวัดคลื่นกระเจิงทั้ง 4 กรณี จะเทียบกับผลการวัดจากแผ่นสังกะสีเรียบในกรณี HH เพียงกรณีเดียว เพราะว่าข้อมูลวัดที่ได้ทุกกรณีจะถูกนำไปคำนวณหาค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของ เมทริกซ์การกระเจิงเพื่อเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งต้องคำนวณจากค่า ของทุกกรณี จึงต้องปรับเทียบด้วยระดับสัญญาณที่เหมือนกัน ดังนั้นระบบวัดโพลาริเซชันของ คลื่นกระเจิงจึงใช้การปรับเทียบเพียงกรณีเดียวสำหรับทุกกรณี

โดยปกตินิยมใช้ตัวปรับเทียบเป็นแผ่นสะท้อนซึ่งเป็นเป้าแบบจุดเพื่อตัดผลของสัญญาณ รบกวนและใช้อ้างอิงค่าของคลื่นที่กระเจิงกลับจากเป้า เพราะคลื่นที่สะท้อนจากเป้าแบบจุดมี ขนาดและทิศทางที่แน่นอนและสามารถคำนวณได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ สำหรับระบบวัด โพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงในวิทยานิพนธ์นี้ ในเบื้องต้นทดลองปรับเทียบสัญญาณด้วยตัว ปรับเทียบ 3 แบบ คือ 1. แผ่นสะท้อนเรียบขนาด  $2.4 \times 2.4$  ตารางเมตรที่วางในแนวราบ 2. แผ่น สะท้อนเรียบขนาด  $1.2 \times 2.4$  ตารางเมตรที่วางในแนวราบ และ 3. แผ่นสะท้อนทรงสามเหลี่ยม (tri-hedral conner reflector) ที่มีความยาวในแต่ละด้าน 1.2 เมตรวางหงายขึ้นในแนวตั้ง ตัวปรับเทียบทั้ง 3 แบบทำจากแผ่นสังกะสีที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร เมื่อนำค่าที่วัดได้มา เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ ปรากฏว่าแผ่นสะท้อนคลื่นเรียบขนาด  $2.4 \times 2.4$  ตารางเมตร ให้ผลที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด สาเหตุที่ทำให้ตัวปรับเทียบอีก 2 แบบ มี ประสิทธิภาพในการปรับเทียบน้อยกว่าน่าจะมาจากขนาดของตัวปรับเทียบที่ใช้เล็ก เกินไป ทำให้สามารถตัดผลของสัญญาณรบกวนที่มาจากสิ่งแวดล้อมได้น้อยลง [18]



### ค่าองค์ประกอบทั้งสี่ของเมทริกซ์การกระจาย

กำลังของคลื่นกระเจิงที่บันทึกลงเครื่องคอมพิวเตอร์ ( $P^M$ ) เทียบกับกำลังของคลื่นที่ส่ง ( $P^t$ ) คือกำลังของคลื่นที่กระเจิงกลับจากพีซีไร ( $P^r$ ) เทียบกับคลื่นที่กระเจิงกลับจากแผ่นสะท้อน ( $P^c$ ) ดังนั้นค่าที่บันทึกมีความสัมพันธ์กับคลื่นกระเจิงดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.3)

$$\frac{P^M}{P^t} = \frac{P^r}{P^c} \quad (4.1)$$

$$10 \log \frac{P^M}{P^t} = 10 \log \frac{P^r/P^t}{P^c/P^t} = 10 \log \frac{P^r}{P^t} - 10 \log \frac{P^c}{P^t} \quad (4.2)$$

$$10 \log \frac{P^r}{P^t} = M + C \quad (4.3)$$

โดยที่	$P^M$	คือ ขนาดกำลังของคลื่นกระเจิงที่บันทึก
	$P^t$	คือ ขนาดกำลังของคลื่นที่ส่ง
	$P^r$	คือ ขนาดกำลังของคลื่นกระเจิงที่ออกจากพีซีไร
	$P^c$	คือ ขนาดกำลังของคลื่นกระเจิงออกจากแผ่นสังกะสีเรียบ
	$M$	คือ อัตราส่วนกำลังของคลื่นกระเจิงที่บันทึกต่อคลื่นที่ส่งออก (หน่วยเป็น dB)
	$C$	คือ อัตราส่วนกำลังของคลื่นกระเจิงจากแผ่นสังกะสีเรียบต่อคลื่นที่ส่งออก (หน่วยเป็น dB)

วิภูภาคของคลื่นกระเจิงที่บันทึกลงบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ( $\phi^M$ ) มีความสัมพันธ์กับวิภูภาคของคลื่นกระเจิงจากพีซีไร ( $\phi^r$ ) และวิภูภาคจากแผ่นสังกะสี ( $\phi^c$ ) ดังแสดงในสมการที่ (4.4)

$$\phi^r - \phi^t = \phi^M + \phi^c \quad (4.4)$$

โดยที่	$\phi^r$	คือ วิภูภาคของคลื่นกระเจิงที่กลับจากพีซีไร
	$\phi^t$	คือ วิภูภาคของคลื่นที่ส่งออก
	$\phi^M$	คือ วิภูภาคของคลื่นกระเจิงที่บันทึก
	$\phi^c$	คือ วิภูภาคของคลื่นกระเจิงที่ออกจากแผ่นสังกะสี



สายอากาศส่งและรับที่ใช้มีการทำงานในแบบแผนคลื่นเป็นใหญ่ ( $TE_{10}$ ) แสดงว่าคลื่นที่ส่งไปมีองค์ประกอบเดียวและมีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นตามแนวแกน H ถ้าพิจารณาการส่งและรับคลื่นในกรณี HH จากสมการที่ (2.9) จะสามารถเขียนสมการนี้ใหม่ได้ดังสมการที่ (4.5) และจัดรูปเพื่อหาค่าของ  $S_{hh}$  ได้ดังสมการที่ (4.6)

$$\mathbf{E}_h^r = \frac{\mathbf{e}^{jkr}}{r} \mathbf{S}_{hh} \mathbf{E}_h^t \quad (4.5)$$

$$S_{hh} = \frac{\mathbf{r}}{\mathbf{e}^{jkr}} \cdot \frac{\mathbf{E}_h^r}{\mathbf{E}_h^t} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \left| \frac{\mathbf{E}_h^r}{\mathbf{E}_h^t} \right| \cdot \mathbf{e}^{j(\phi_h^r - \phi_h^t)} \quad (4.6)$$

ดังนั้นจาก สมการที่ (4.3) (4.4) และ (4.6) สามารถแสดงค่าของ  $S_{hh}$  ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_{hh} &= \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \mathbf{10}^{(M_{hh}+C)/20} \cdot \mathbf{e}^{j(\phi_{hh}^M + \phi^C)} \\ &= \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \mathbf{10}^{M_{hh}/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi_{hh}^M} \cdot \mathbf{10}^{C/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi^C} \end{aligned} \quad (4.7)$$

ในทำนองเดียวกันกรณี HV VH และ VV จะสามารถแสดงค่าของ  $S_{hv}$   $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  ได้ ดังสมการที่ (4.8) (4.9) และ(4.10) ตามลำดับ

$$S_{hv} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \mathbf{10}^{M_{hv}/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi_{hv}^M} \cdot \mathbf{10}^{C/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi^C} \quad (4.8)$$

$$S_{vh} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \mathbf{10}^{M_{vh}/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi_{vh}^M} \cdot \mathbf{10}^{C/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi^C} \quad (4.9)$$

$$S_{vv} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \mathbf{10}^{M_{vv}/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi_{vv}^M} \cdot \mathbf{10}^{C/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi^C} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.7) ถึง (4.10) หากด้วยพจน์ที่เกิดจากการปรับเทียบได้จะสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (4.11) ถึง (4.14)

$$S_{hh}^C = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \mathbf{10}^{M_{hh}/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi_{hh}^M} \quad (4.11)$$

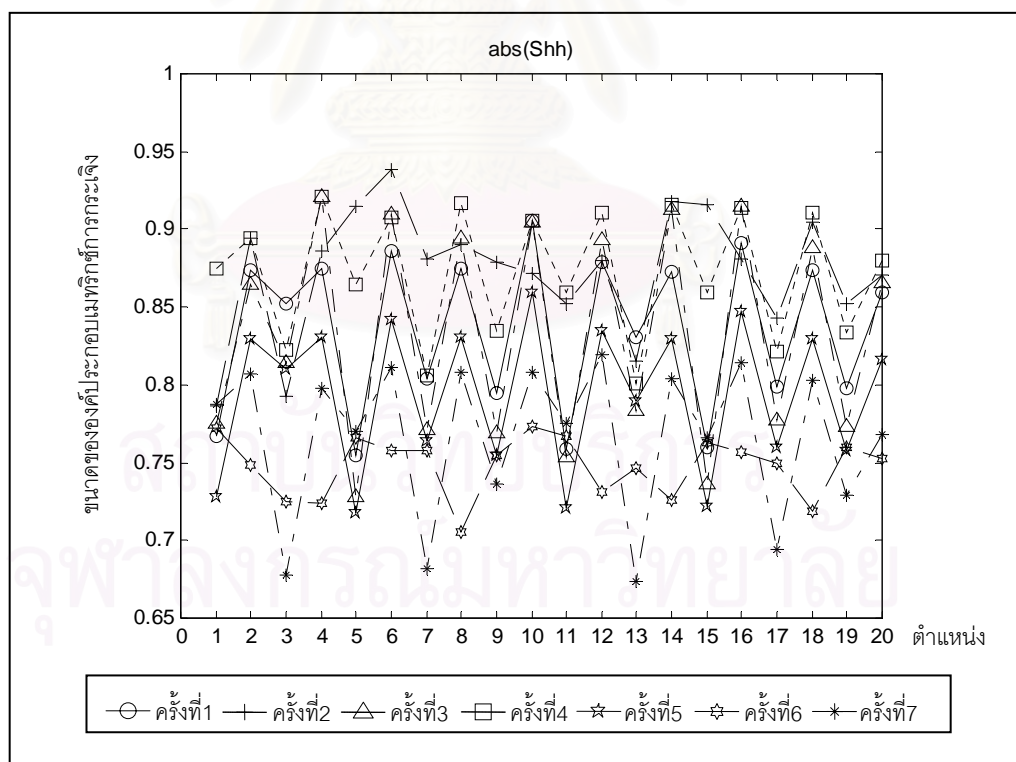
$$S_{hv}^C = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}^{-jkr} \cdot \mathbf{10}^{M_{hv}/20} \cdot \mathbf{e}^{j\phi_{hv}^M} \quad (4.12)$$

$$S_{vh}^C = r \cdot e^{-jkr} \cdot 10^{M_{vh}/20} \cdot e^{j\phi_{vh}^M} \quad (4.13)$$

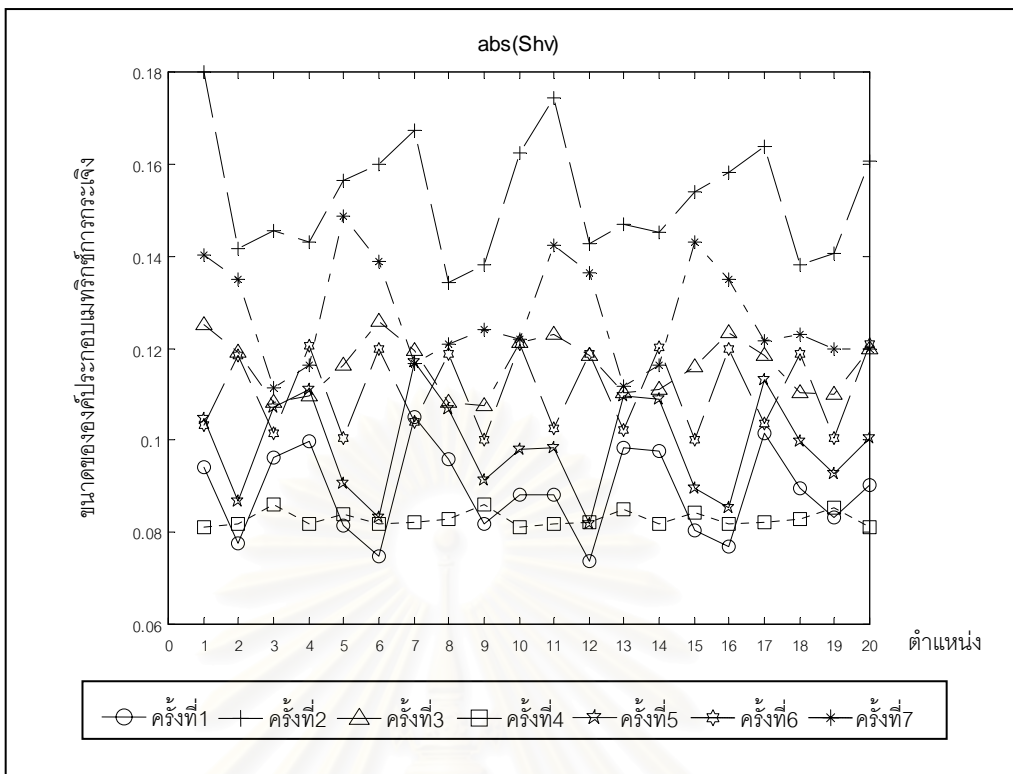
$$S_{vv}^C = r \cdot e^{-jkr} \cdot 10^{M_{vv}/20} \cdot e^{j\phi_{vv}^M} \quad (4.14)$$

โดยที่  $S_{hh}^C$   $S_{hv}^C$   $S_{vh}^C$  และ  $S_{vv}^C$  คือค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงเทียบกับคลื่นที่กระเจิงกลับจากแผ่นสังกะสีเรียบ

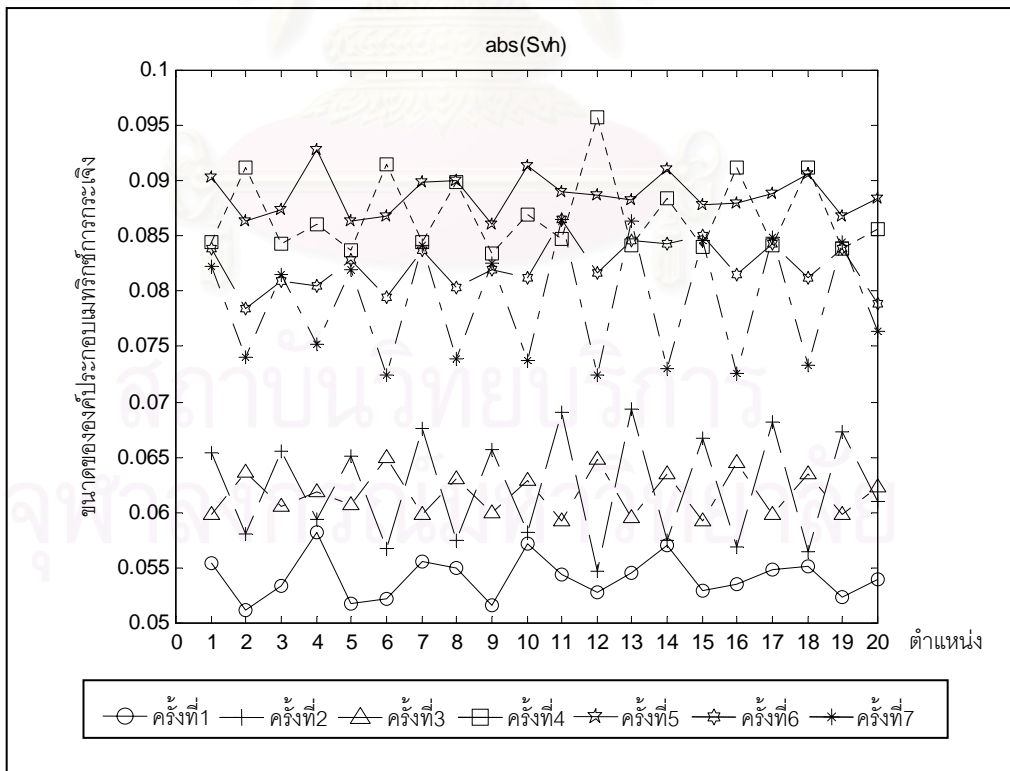
สมการที่ (4.11) ถึง (4.14) แสดงให้เห็นว่าสามารถหาค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงของพีซีไร่ได้จากผลการวัดโดยตรงแม้ว่าค่าที่ได้จะเป็นค่าอ้างอิงกับการกระเจิงกลับจากแผ่นสังกะสีเรียบ ผลการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงของพีซีไร่ทั้ง 3 ชนิดทั้ง 7 ครั้งสามารถนำมาคำนวณหาค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงได้ เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณที่ความถี่ต่างๆ ที่ใช้ในการวัดพบว่าค่าที่ได้จากแต่ละความถี่มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 8 ความถี่ ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยของความถี่ทุกค่าเป็นตัวแทนของผลการคำนวณในทุกตำแหน่งและแสดงผลการคำนวณดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.12



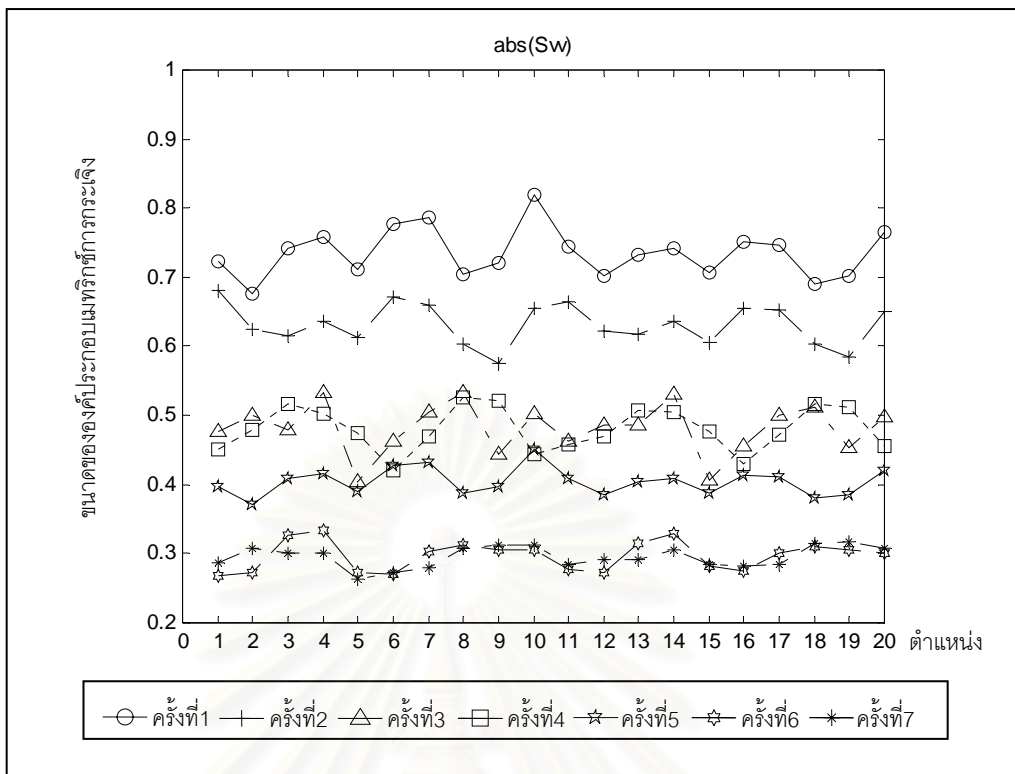
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบ  $S_{hh}$  ของถั่วลิสง



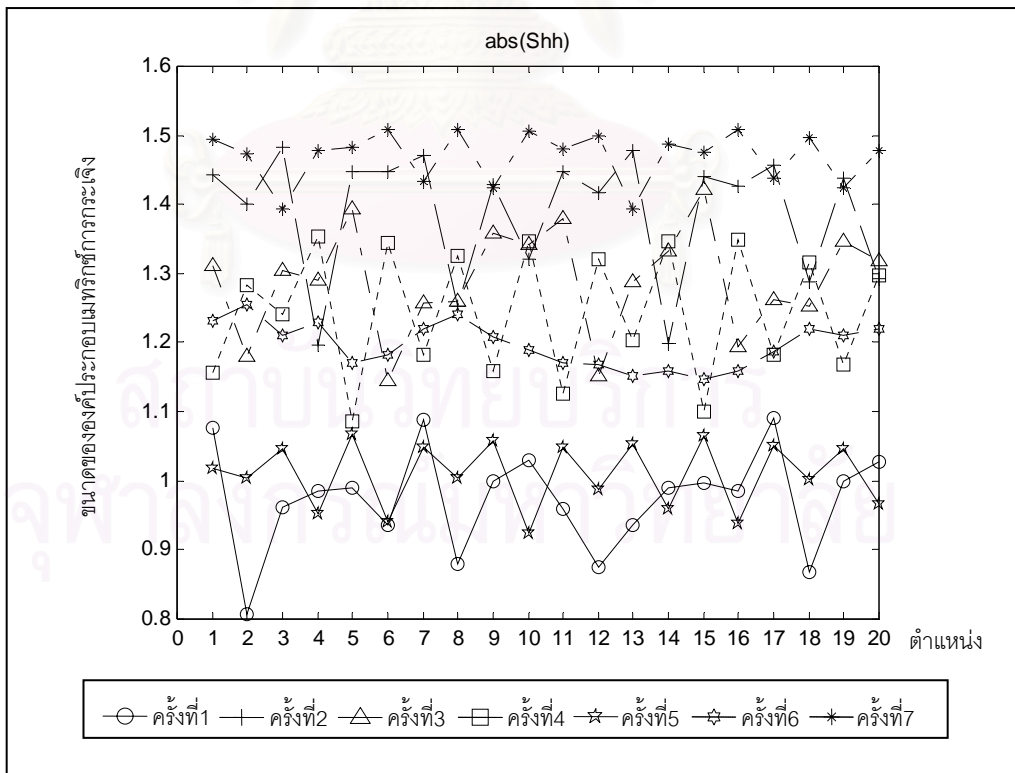
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบ  $S_{hv}$  ของถั่วลิสง



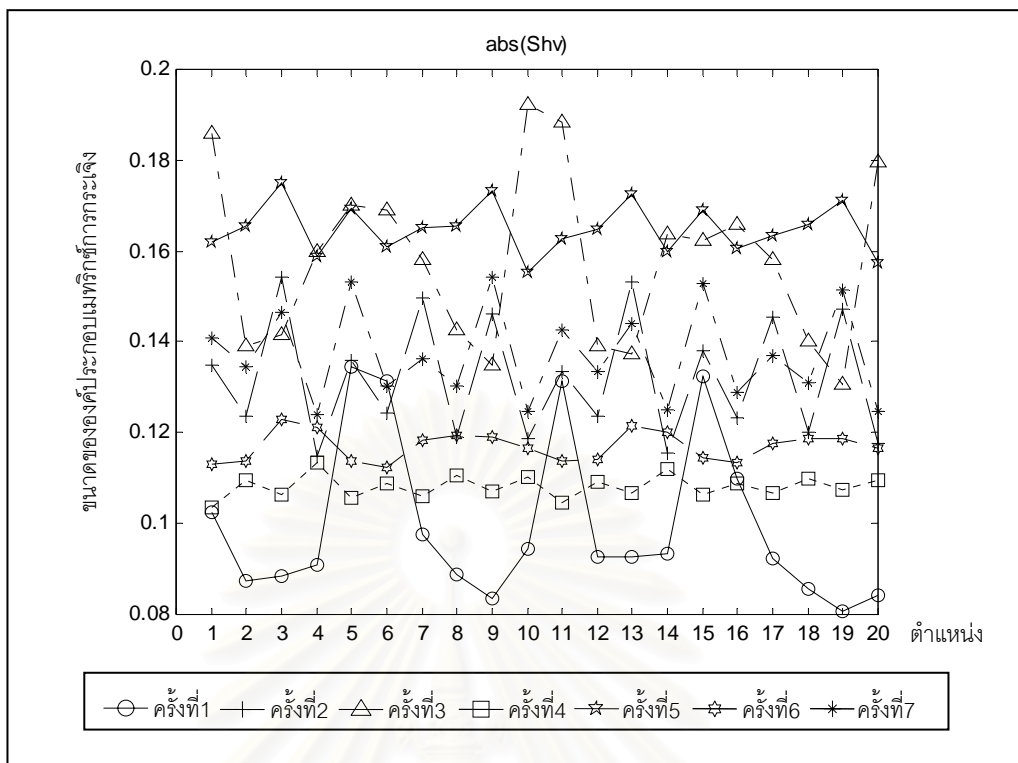
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบ  $S_{vh}$  ของถั่วลิสง



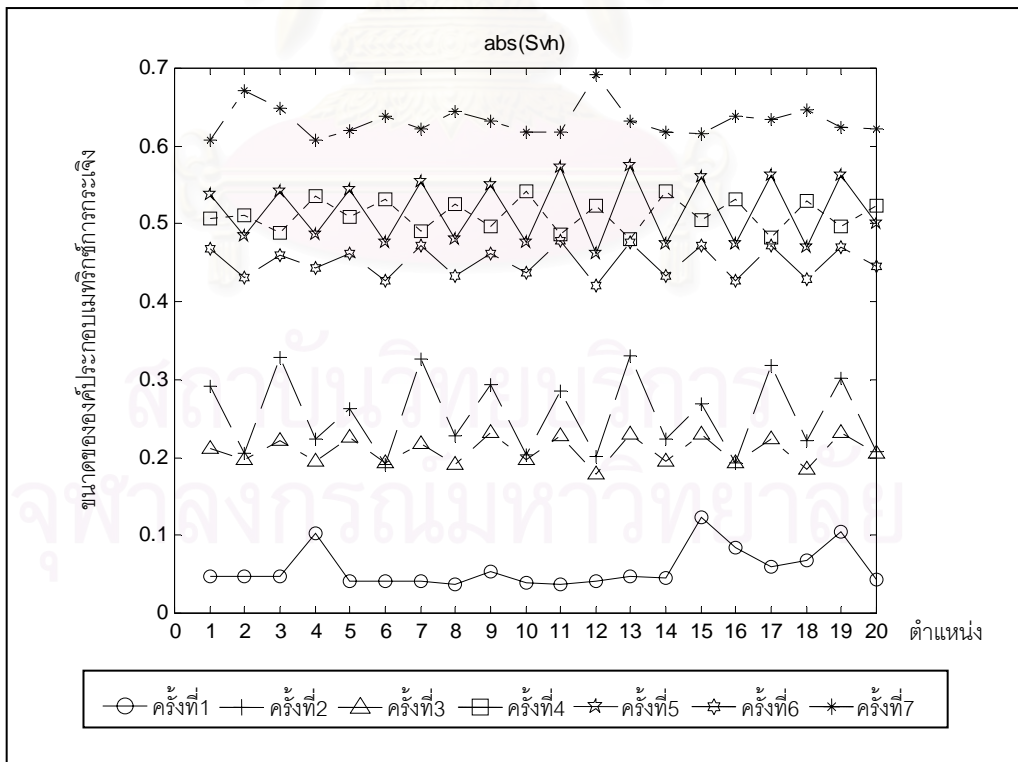
รูปที่ 4.4 องค์ประกอบ  $S_w$  ของถั่วลิสง



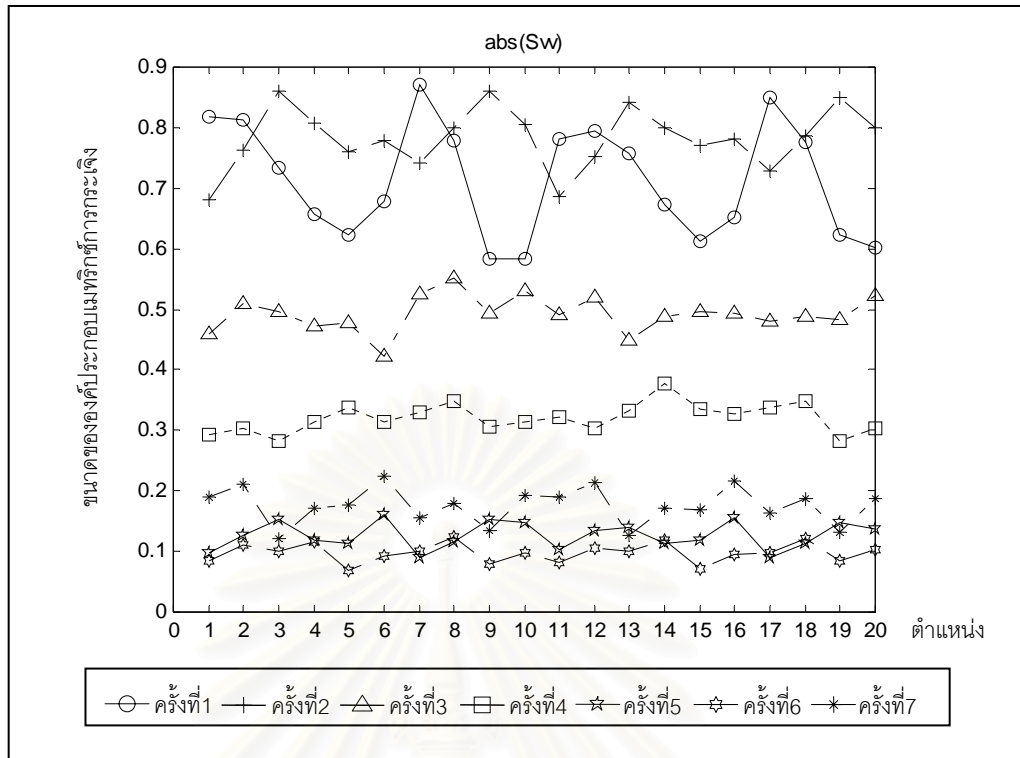
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบ  $S_{hh}$  ของทานตะวัน



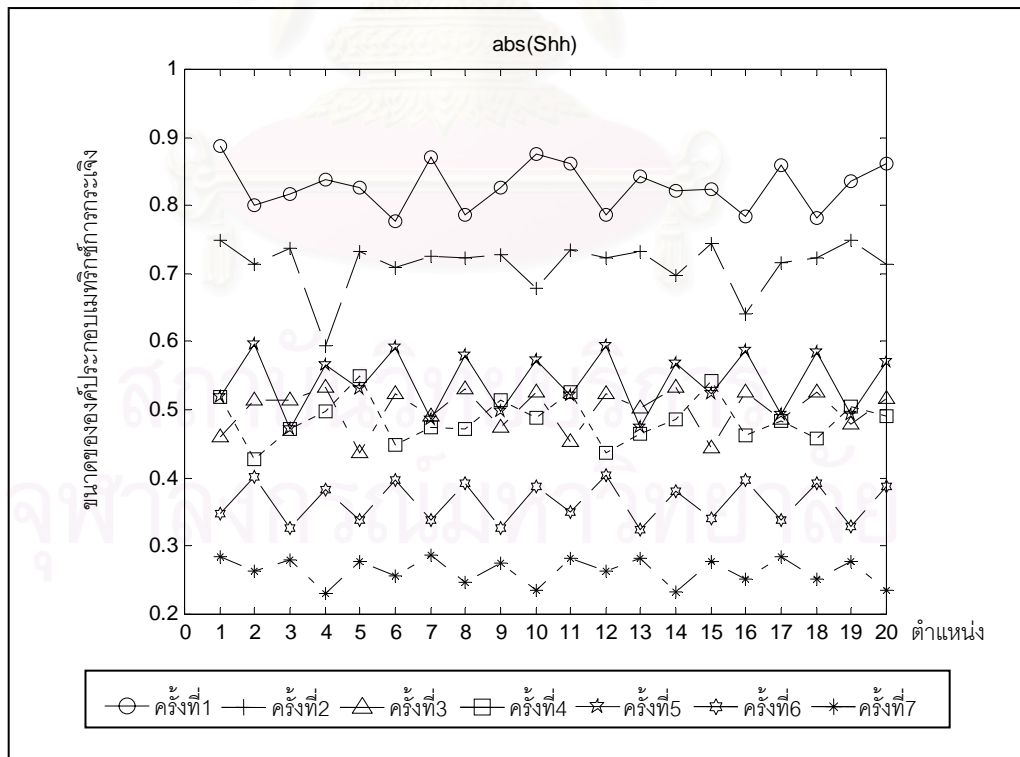
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบ  $S_{IV}$  ของทานตะวัน



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบ  $S_{vh}$  ของทานตะวัน

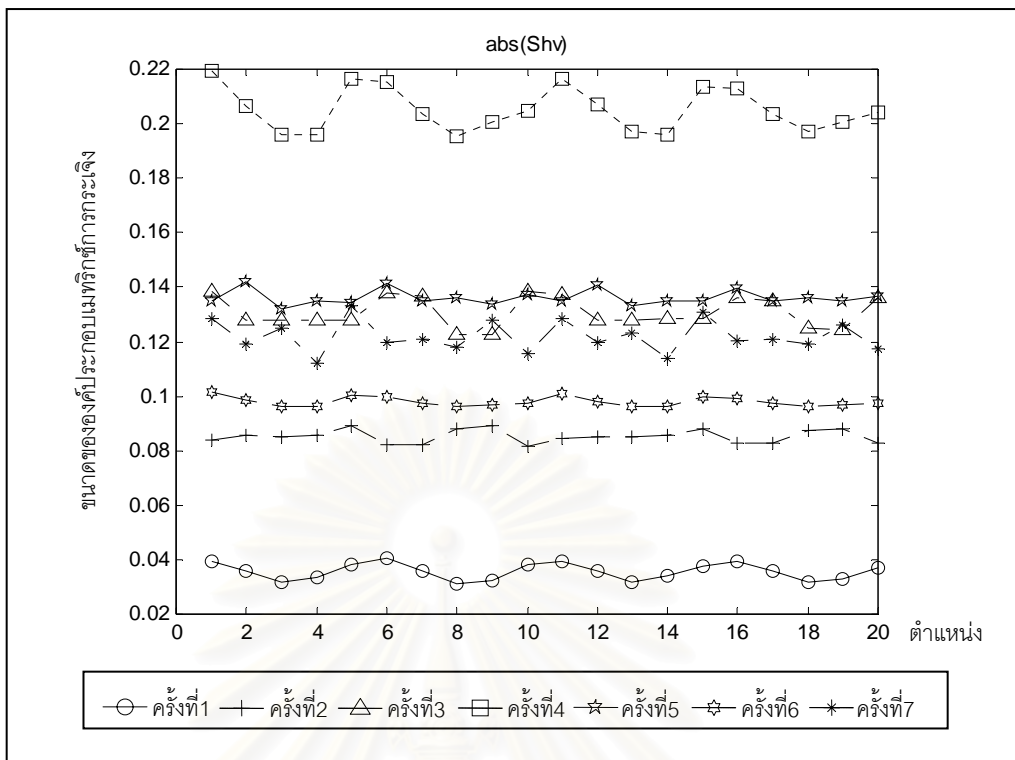


รูปที่ 4.8 องค์ประกอบ  $S_w$  ของทานตะวัน

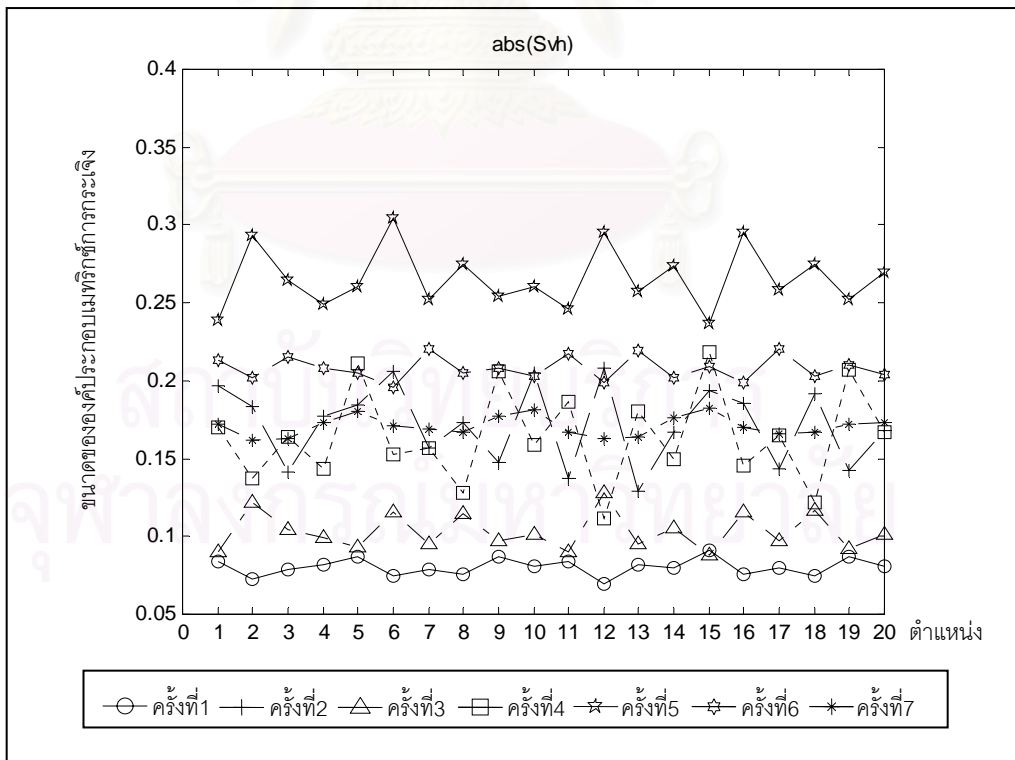


รูปที่ 4.9 องค์ประกอบ  $S_{hh}$  ของข้าวโพดหวาน

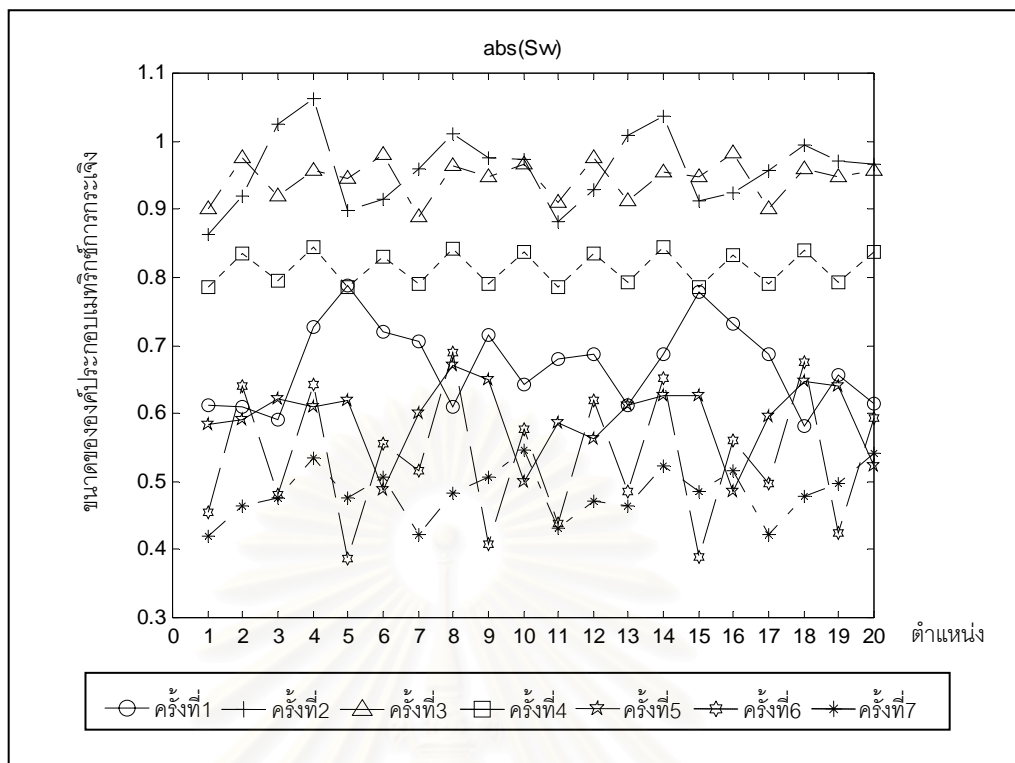




รูปที่ 4.10 องค์ประกอบ  $S_{hv}$  ของข้าวโพดหวาน



รูปที่ 4.11 องค์ประกอบ  $S_{vh}$  ของข้าวโพดหวาน



รูปที่ 4.12 องค์ประกอบ  $S_w$  ของข้าวโพดหวาน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระจายของถั่วลิสงตามรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 พบว่าค่าเฉลี่ยของ  $S_{vh}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้นและสามารถแยกข้อมูลออกได้เป็น 2 กลุ่ม แต่ค่าเฉลี่ยของ  $S_w$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้นและสามารถแยกข้อมูลออกได้เป็น 4 กลุ่ม ส่วนค่าเฉลี่ยของ  $S_{hh}$  และค่าเฉลี่ย  $S_{hv}$  ไม่สามารถแยกข้อมูลจากการวัดทั้ง 7 ครั้งออกจากกันได้

จากรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 พบว่าลักษณะโดยรวมขององค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระจายของทานตะวันมีความคล้ายกับกรณีถั่วลิสง แต่ข้อมูลจากการวัดในแต่ละครั้งสามารถแยกออกจากกันได้ชัดเจนกว่ากรณีถั่วลิสง โดยค่าเฉลี่ยของ  $S_{vh}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทานตะวันมีอายุมากขึ้นและสามารถแยกข้อมูลออกได้เป็น 4 กลุ่ม ค่าเฉลี่ยของ  $S_w$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อทานตะวันมีอายุมากขึ้นและสามารถแยกข้อมูลออกได้เป็น 4 กลุ่มเท่ากันแต่มีรายละเอียดต่างกัน ส่วนค่าเฉลี่ยของ  $S_{hh}$  และค่าเฉลี่ย  $S_{hv}$  ไม่พบสิ่งที่น่าสนใจเมื่อพิจารณาเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตเช่นเดียวกับกรณีถั่วลิสง

จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 พบว่าค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระจายของข้าวโพดหวานมีลักษณะแตกต่างจากกรณีถั่วลิสงและทานตะวัน โดยค่าเฉลี่ยของ  $S_{nh}$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อข้าวโพดหวานมีอายุเพิ่มขึ้นและสามารถแยกข้อมูลออกได้เป็น 5 กลุ่มอย่างชัดเจนสำหรับค่าเฉลี่ยของ  $S_{nv}$ ,  $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  นั้นข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้งมีการกระจายน้อยกว่ากรณีถั่วลิสงและทานตะวันและสามารถแยกออกจากกันได้พอสมควรแต่ไม่เป็นประโยชน์แก่การติดตามการเจริญเติบโตเมื่อพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบของเมทริกซ์การกระจายเพียงองค์ประกอบเดียว เนื่องจากมีการซ้อนกันของข้อมูลจากการวัดที่มีสถานะการเจริญเติบโตต่างกันมากๆ เช่น ค่าเฉลี่ยของ  $S_{nv}$  จากการวัดครั้งที่ 3 5 และ 7 ไม่สามารถแยกออกจากกันได้

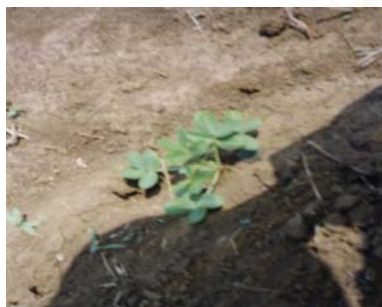
### ผลการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ทางพฤกษศาสตร์

การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ทางพฤกษศาสตร์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชไร่ การเจริญเติบโตนี้แยกออกเป็น 2 ส่วนคือ การเจริญเติบโตทางลำต้นและการเจริญเติบโตทางการเจริญพันธุ์ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลจากพืชไร่ทั้งสิ้น 7 ครั้งและเก็บข้อมูลของพืชไร่ในวันเดียวกันกับที่มีการวัดโพลาริเซนของคลีนกระเจิง ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์ที่บันทึกผลเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้วัดจากพืชไร่ในแปลงทดลองทั้ง 20 ตำแหน่ง ยกเว้นน้ำหนักของพืชไร่ซึ่งไม่สามารถใช้ค่าเฉลี่ยของทั้ง 20 ตำแหน่งได้เนื่องจากต้องถอนพืชไร่ทั้งต้นมาชั่งน้ำหนักบนตาชั่งจึงกำหนดให้ถอนพืชไร่จากบริเวณด้านท้ายของแปลงทดลองเดียวกันซึ่งปลูกเตรียมไว้สำหรับการชั่งน้ำหนักโดยเฉพาะ และเมื่อถอนพืชไร่บางส่วนไปแล้วจะไม่ส่งผลกระทบต่อกรวัดโพลาริเซนของคลีนกระเจิงในครั้งต่อไป เนื่องจากบริเวณที่วัดโพลาริเซนจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 13 เมตรแรกของแต่ละแปลงจากความยาวของแปลงทั้งหมด 14 เมตร ในการชั่งน้ำหนักแต่ละครั้งจะถอนพืชไร่มา 5 ต้น แล้วใช้ค่าเฉลี่ยของทั้ง 5 ต้นเป็นตัวแทนของข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้ง

## ถั่วลิสง

ครั้งที่ 1      อายุ 7 วัน      ความสูง 5.6 เซนติเมตร      น้ำหนัก 12.2 กรัม

ลำต้นตั้งตรงมีขนาดเล็ก ที่ส่วนบนของลำต้นมีก้านใบ 4-5 ก้าน แต่ละก้านประกอบด้วยใบย่อย 2 คู่ ใบย่อยแต่ละใบมีลักษณะเป็นรูปวงรี มีความกว้างประมาณ 1.2-1.8 เซนติเมตร มีความยาวประมาณ 2.5 –3.0 เซนติเมตร



รูปที่ 4.13 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในการวัดครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2      อายุ 21 วัน      ความสูง 8.0 เซนติเมตร      น้ำหนัก 46.9 กรัม

มีกิ่งแตกออกจากลำต้นหลัก 4-5 กิ่ง แต่ละกิ่งมีก้านใบประมาณ 4-6 อัน ซึ่งประกอบด้วยใบย่อย 2 คู่เช่นเดิม แต่ใบย่อยมีขนาดใหญ่ขึ้น มีความกว้างประมาณ 2.0-2.2 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.5-4.0 เซนติเมตร ทรงต้นมีลักษณะเป็นพุ่มคลุมดิน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-20 เซนติเมตร บางต้นเริ่มมีดอกขนาดเล็กสีเหลืองแตกออกมาจากข้อของลำต้น



รูปที่ 4.14 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในการวัดครั้งที่ 2



ครั้งที่ 3      อายุ 35 วัน      ความสูง 13.2 เซนติเมตร      น้ำหนัก 115.2 กรัม

มีกิ่งแตกออกจากลำต้นหลัก 6-7 กิ่ง แต่ละกิ่งเลื้อยไปตามแนวนอนแผ่ออกไปทุกทิศทาง รอบต้น แต่ละกิ่งมีก้านใบแตกออกมาจำนวนมาก จึงเปรียบเสมือนมีพื้นที่สีเขียวปกคลุมดิน ในการวัดครั้งนี้มีพื้นที่สีเขียวปกคลุมดินเกือบทั่วท้องร่อง ทำให้มองไม่เห็นระยะห่างระหว่างหลุมปลูก แต่ยังคงทะลุลงไปเห็นดินด้านล่างของท้องร่องได้บ้าง มีพื้นที่สีเขียวปกคลุมดินประมาณร้อยละ 50 ของพื้นที่แปลงทั้งหมด ใบย่อยแต่ละใบมีขนาดใหญ่ขึ้น มีความกว้าง 2.2-2.5 เซนติเมตร มีความยาว 5.5-6.5 เซนติเมตร แต่ละกิ่งมีดอกสีเหลืองขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร แตกออกมาจากข้อของลำต้นของแต่ละกิ่ง กิ่งละประมาณ 5-6 ดอก เริ่มมีฝักขนาดเล็กอยู่ใต้ผิวดิน



รูปที่ 4.15 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในการวัดครั้งที่ 3

ครั้งที่ 4      อายุ 49 วัน      ความสูง 22.4 เซนติเมตร      น้ำหนัก 185.7 กรัม

มีกิ่งแตกออกจากลำต้นหลักประมาณ 7-8 กิ่ง แต่ละกิ่งมีความยาวประมาณ 30-40 เซนติเมตร เลื้อยไปตามแนวราบและปลายกิ่งชูขึ้นในแนวตั้ง แต่ละกิ่งมีใบย่อยจำนวนมากมีขนาดใกล้เคียงกับการวัดครั้งที่ 3 แต่ละกิ่งมีดอกประมาณ 7-8 ดอก และเริ่มมีการแทงเข็มลงดินกิ่งละประมาณ 3-4 จุด ฝักที่โคนต้นหลักยาวประมาณ 1 เซนติเมตร อยู่ใต้ดินมีจำนวนประมาณ 20-28 ฝักต่อต้น มีพื้นที่สีเขียวปกคลุมทั่วท้องร่องจนไม่สามารถมองเห็นดินใต้ท้องร่องได้และเริ่มเลื้อยขึ้นไปบริเวณสันร่อง โดยมีพื้นที่สีเขียวปกคลุมดินประมาณร้อยละ 60 ของพื้นที่ทั้งหมด



รูปที่ 4.16 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในการวัดครั้งที่ 4

ครั้งที่ 5 อายุ 63 วัน ความสูง 31.6 เซนติเมตร น้ำหนัก 242.5 กรัม

มีจำนวนกิ่งแตกออกจากต้นหลักเท่ากับครั้งที่ 4 แต่กิ่งยาวมากขึ้น คือยาวประมาณ 55-64 เซนติเมตร แผ่ไปในแนวราบมากขึ้น และปลายชูขึ้นในแนวตั้งเช่นเดิม แต่ละกิ่งมีใบจำนวนมาก คิดเป็นพื้นที่สีเขียวปกคลุมดินประมาณร้อยละ 80 ของพื้นที่ทั้งหมด มีเข็มแทงลงดินมากขึ้น ที่ปลายเข็มใต้ดินมีการเจริญเติบโตเป็นฝักขนาดเล็ก และฝักที่บริเวณโคนต้นมีขนาดใหญ่ขึ้นมีความยาวประมาณ 2.5-3.0 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-0.8 เซนติเมตร



รูปที่ 4.17 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในการวัดครั้งที่ 5

ครั้งที่ 6 อายุ 77 วัน ความสูง 43.2 เซนติเมตร น้ำหนัก 330.1 กรัม

กิ่งมีความยาวมากขึ้น โดยมีความยาวประมาณ 70-78 เซนติเมตร ปลายกิ่งแต่ละกิ่งชูตั้งขึ้นในแนวตั้งมากขึ้น และมีพื้นที่สีเขียวปกคลุมเกือบทั้งแปลง มีความหนาแน่นของใบที่ปกคลุมดินมากขึ้น มีดอกเฉพาะบริเวณปลายของแต่ละกิ่งประมาณ 5-6 ดอก ฝักที่เกิดจากการแทงเข็มลงดินมีขนาดใหญ่ขึ้น มาความยาวประมาณ 2.0-2.8 เซนติเมตร ส่วนฝักที่โคนต้นมีขนาดใหญ่กว่าเดิมเล็กน้อยความยาวประมาณ 2.7-3.3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.0-1.3 เซนติเมตร



รูปที่ 4.18 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในการวัดครั้งที่ 6



ครั้งที่ 7      อายุ 93 วัน      ความสูง 51.4 เซนติเมตร      น้ำหนัก 315.7 กรัม

แต่ละกึ่งมีความยาวมากขึ้นเล็กน้อยโดยมีความยาวประมาณ 82-87 เซนติเมตร ปลายกิ่งชูขึ้นในแนวตั้งมากขึ้นแต่มีพื้นที่สีเขียวปกคลุมดินน้อยลงเนื่องจากใบบางส่วนเริ่มเหี่ยว ไม่มีดอกเลย ฝักที่โคนต้นโตเต็มที่ขนาดเท่าครั้งที่ 6 เมื่อแกะฝักดูมีเมล็ดข้างในเต็มฝัก ส่วนฝักที่เกิดจากการแทงเข็มมีขนาดเล็กกว่าฝักที่โคนต้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.19 สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในการวัดครั้งที่ 7

#### ทานตะวัน

ครั้งที่ 1      อายุ 10 วัน      ความสูง 7.5 เซนติเมตร      น้ำหนัก 24.2 กรัม

ลำต้นตั้งตรงมีขนาดเล็ก มีใบขนาดใหญ่ 4 ใบ รูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีความยาวประมาณ 5-6 เซนติเมตร ความกว้างมากที่สุด 3.5-4.0 เซนติเมตร ขอบใบเป็นรอยหยักเล็กๆ ใบขึ้นเป็นคู่อยู่ตรงข้ามกันและตั้งฉากกับคู่ที่อยู่ติดกันที่ปลายลำต้นมีใบขนาดเล็ก 2-4 ใบ



รูปที่ 4.20 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันในการวัดครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2 อายุ 25 วัน ความสูง 29.3 เซนติเมตร น้ำหนัก 63.4 กรัม  
 ลำต้นตั้งตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.7-1.0 เซนติเมตร มีขนขนาดเล็กขึ้นทั่ว  
 ลำต้น ใบมีขนาดและรูปร่างเปลี่ยนแปลงจากเดิมมาก โดยมีรูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มี  
 ฐานโค้งมน มีความกว้างฐานประมาณ 8-10 เซนติเมตร ยาวประมาณ 10-12 เซนติเมตร เห็น  
 ขอบใบหยักอย่างชัดเจน ใบมีความหนามากขึ้น มีจำนวนใบประมาณ 12-14 ใบต่อต้น



รูปที่ 4.21 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันในการวัดครั้งที่ 2

ครั้งที่ 3 อายุ 39 วัน ความสูง 56.7 เซนติเมตร น้ำหนัก 108.4 กรัม  
 ลำต้นตั้งตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2-1.5 เซนติเมตร ขนตามลำต้นมีขนาด  
 ใหญ่และแข็งกว่าเดิม ใบมีขนาดใหญ่ขึ้นและรูปร่างคล้ายรูปหัวใจ มีขนาดกว้างที่สุดประมาณ  
 16-17 เซนติเมตร ยาวประมาณ 18-20 เซนติเมตร ใบหยาบ ขอบใบหยัก มีจำนวน 20-22 ใบต่อ  
 ต้น



รูปที่ 4.22 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันในการวัดครั้งที่ 3

ครั้งที่ 4 อายุ 53 วัน ความสูง 102.3 เซนติเมตร น้ำหนัก 179.3 กรัม

ลำต้นตั้งตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5-1.8 เซนติเมตร มีขนทั่วลำต้น ปลายลำต้นมีช่อดอกงอขึ้นฟ้า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 เซนติเมตร มีฐานรองดอกลักษณะเป็นจานวงกลมมีปลายแหลมหุ้มดอกอยู่ ใบมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อยมีขนาดกว้างประมาณ 16-17 เซนติเมตร ยาวประมาณ 22 เซนติเมตร มีใบที่ยังสมบูรณ์ 20-22 ใบต่อต้น มีใบที่เหี่ยวอยู่บริเวณโคนต้น 2-3 ใบ มีบางต้นที่ดอกเริ่มบานออกแต่ยังไม่บานเต็มที่



รูปที่ 4.23 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันในการวัดครั้งที่ 4

ครั้งที่ 5 อายุ 67 วัน ความสูง 135.8 เซนติเมตร น้ำหนัก 251.9 กรัม

ลำต้นตั้งตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.2-2.5 เซนติเมตร มีขนทั่วลำต้น ต้นปลายลำต้นมีช่อดอกที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิม โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-6 เซนติเมตร กลีบของฐานรองดอกเริ่มบานออก ช่อดอกเริ่มเอียงไปทางทิศตะวันออก ใบมีขนาดเท่าเดิมและมีจำนวนใบที่ยังสมบูรณ์ประมาณ 22-23 ใบ มีใบที่เหี่ยวอยู่บริเวณโคนต้น 4-5 ใบ มีบางต้นดอกที่บานออกจนสามารถเห็นดอกย่อยข้างในสีเขียว



รูปที่ 4.24 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันในการวัดครั้งที่ 5



ครั้งที่ 6 อายุ 81 วัน ความสูง 157.1 เซนติเมตร น้ำหนัก 346.2 กรัม  
 ลำต้นตั้งตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.4-2.6 เซนติเมตร ดอกบานหมดทั้งแปลงหันไปทางทิศตะวันออก กลีบดอกสีเหลืองยาวประมาณ 4-5 เซนติเมตร บานออกเต็มที่เส้นผ่านศูนย์กลางของจานดอกประมาณ 15-20 เซนติเมตร ดอกย่อยที่อยู่ด้านในส่วนใหญ่ได้รับการผสมแล้วและเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ใบมีขนาดเท่าเดิม แต่มีความชื้นน้อยลงและผิวใบขรุขระมากขึ้น ใบที่อยู่ด้านล่างของลำต้นส่วนมากเหี่ยว มีสีเหลืองบนเขียว มีใบที่เหี่ยวไปแล้วสีน้ำตาลประมาณ 7-8 ใบ มีบางดอกที่กลีบดอกเริ่มเหี่ยวและจานดอกเริ่มเอียงลง



รูปที่ 4.25 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันในการวัดครั้งที่ 6

ครั้งที่ 7 อายุ 96 วัน ความสูง 155.7 เซนติเมตร น้ำหนัก 338.7 กรัม  
 ลำต้นส่วนใหญ่เอียงไปทางด้านหน้าเล็กน้อย ลำต้นแห้ง และมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเหลือประมาณ 2.0-2.2 เซนติเมตร จานดอกคว่ำลง กลีบดอกเหี่ยวหมดแล้ว เหลือแต่ฐานรองดอกหุ้มจานดอกไว้ บางดอกฐานรองดอกก็เริ่มเหี่ยว เมล็ดในจานดอกมีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีสีน้ำตาล จานดอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 16-24 เซนติเมตร ใบเหี่ยวและผิวใบขรุขระมากทั่วทั้งต้นมีสีเหลืองบนเขียว มีใบเหลืองอยู่ประมาณ 8-10 ใบต่อต้น นอกนั้นเหี่ยวและแห้งเป็นสีน้ำตาลอยู่ข้างๆ ลำต้น



รูปที่ 4.26 สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันในการวัดครั้งที่ 7

### ข้าวโพดหวาน

ครั้งที่ 1      อายุ 8 วัน      ความสูง 5.2 เซนติเมตร      น้ำหนัก 17.4 กรัม

ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-0.7 เซนติเมตร มีกาบใบหุ้มลำต้นมีใบจำนวน 3-4 ใบลักษณะเรียวยาวปลายแหลม ยาวประมาณ 15-18 เซนติเมตร กว้าง 1.5-1.9 เซนติเมตร



รูปที่ 4.27 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในการวัดครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2      อายุ 22 วัน      ความสูง 32.3 เซนติเมตร      น้ำหนัก 48.3 กรัม

ลำต้นมีขนาดใหญ่ขึ้นมากมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3-1.5 เซนติเมตร มีใบ 6-7 ใบ มีกาบใบหุ้มลำต้นและแผ่นใบที่กางออกเรียวยาวคล้ายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ปลายใบลู่เข้าหากัน เป็นรูปสามเหลี่ยมมีความยาวประมาณ 35-40 เซนติเมตร แผ่นใบกว้าง 3.3-4.1 เซนติเมตร



รูปที่ 4.28 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในการวัดครั้งที่ 2

ครั้งที่ 3      อายุ 36 วัน      ความสูง 65.4 เซนติเมตร      น้ำหนัก 113.5 กรัม

ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.8-2.0 เซนติเมตร มีกาบใบหุ้มลำต้นและแผ่นใบที่กางออกรูปร่างเหมือนเดิมแต่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีความยาวประมาณ 50-55 เซนติเมตร กว้าง 6-7 เซนติเมตร มีขนขนาดเล็กขึ้นที่ใบและกาบใบ มีจำนวนใบ 11-12 ใบต่อต้น



รูปที่ 4.29 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในการวัดครั้งที่ 3

ครั้งที่ 4      อายุ 50 วัน      ความสูง 127.7 เซนติเมตร      น้ำหนัก 235 กรัม

ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.1-2.5 เซนติเมตร มีใบ 14 ใบต่อต้น โดยแต่ละใบมีความยาวประมาณ 60-65 เซนติเมตร กว้างประมาณ 7-8 เซนติเมตร มีช่อดอกตัวผู้ที่ปลายลำต้น มีก้านดอกยาวประมาณ 30 เซนติเมตร มีกิ่งของดอกย่อยแตกออกไป 8-10 กิ่ง แต่ละกิ่งมีดอกย่อยเรียงไปตามแนวยาว มีฝักขนาดเล็กงอกออกจากบริเวณข้อของลำต้น สูงจากพื้นดินประมาณ 50-60 เซนติเมตรต้นละ 1-2 ฝัก



รูปที่ 4.30 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในการวัดครั้งที่ 4



ครั้งที่ 5      อายุ 64 วัน      ความสูง 147.6 เซนติเมตร      น้ำหนัก 368.2 กรัม

ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5-2.8 เซนติเมตร มีใบ 16-18 ใบต่อต้น โดยแต่ละใบมีความยาวประมาณ 72-75 เซนติเมตร กว้างประมาณ 8-9 เซนติเมตร ฝักมีขนาดใหญ่ขึ้น มีความยาวประมาณ 8-10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-4 เซนติเมตร มีไหมงอกพันกาบหุ้มฝักออกมา ส่วนใหญ่มีสีเขียวอ่อนเกือบขาว บางฝักไหมเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล



รูปที่ 4.31 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในการวัดครั้งที่ 5

ครั้งที่ 6      อายุ 78 วัน      ความสูง 152.3 เซนติเมตร      น้ำหนัก 525.3 กรัม

ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.0-3.3 เซนติเมตร ใบมีขนาดใกล้เคียงกับครั้งที่ 5 แต่มีลักษณะทางออกไปในแนวระดับมากขึ้น จำนวน 16-18 ใบต่อต้น ฝักมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก โดยมีความยาวประมาณ 25-28 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-6 เซนติเมตร เหลือไหมงอกพันกาบหุ้มฝักเล็กน้อยมีสีน้ำตาล ใบบริเวณโคนต้นเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง



รูปที่ 4.32 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในการวัดครั้งที่ 6

ครั้งที่ 7      อายุ 93 วัน      ความสูง 151.4 เซนติเมตร      น้ำหนัก 447.9 กรัม

ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเล็กน้อยเหลือประมาณ 2.7-2.9 เซนติเมตร ทั้งลำต้นและใบมีความชื้นลดลง ใบแผ่กางออกมากขึ้น ใบบริเวณด้านล่างแห้งเป็นสีน้ำตาล ฝักมีขนาดใหญ่ขึ้น ยาวประมาณ 29-33 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 เซนติเมตร ส่วนใหญ่เห็นเฉพาะกาบหุ้มฝัก แต่มีบางฝักที่เห็นไหมโผล่ออกมาเล็กน้อยเป็นสีน้ำตาลเข้ม



รูปที่ 4.33 สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานในการวัดครั้งที่ 7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สารสนเทศเกี่ยวกับสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ ที่ได้จากโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิง

ข้อมูลที่ได้จากระบบวัดโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงจะนำมาหาค่าองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิงเพื่อเป็นค่าพื้นฐานสำหรับนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้แสดงลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิง แนวทางที่ใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงเพื่อเสนอเป็นดัชนีที่ใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่สามารถแบ่งได้เป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางแรกเป็นการพิจารณาข้อมูลด้วยค่าทางสถิติ แนวทางที่สองเป็นการพิจารณาลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิง การพิจารณาข้อมูลด้วยค่าทางสถิติ คือ การพิจารณาข้อมูลของพืชไร่แต่ละชนิดด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยทางสถิติของข้อมูลเพื่อบอกความแตกต่างของพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ กัน ส่วนการพิจารณาลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิง คือ การพิจารณาลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงในแง่มุมต่างๆ อันได้แก่ระดับพลังงานโพลาริเซชัน สถานะโพลาริเซชัน และความเข้มของพลังงานในแต่ละโพลาริเซชัน เป็นต้น ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงดัชนีที่คำนวณได้จากการวัดโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ ผลการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่างๆ สุดท้ายจะเป็นการสรุปการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่างๆ

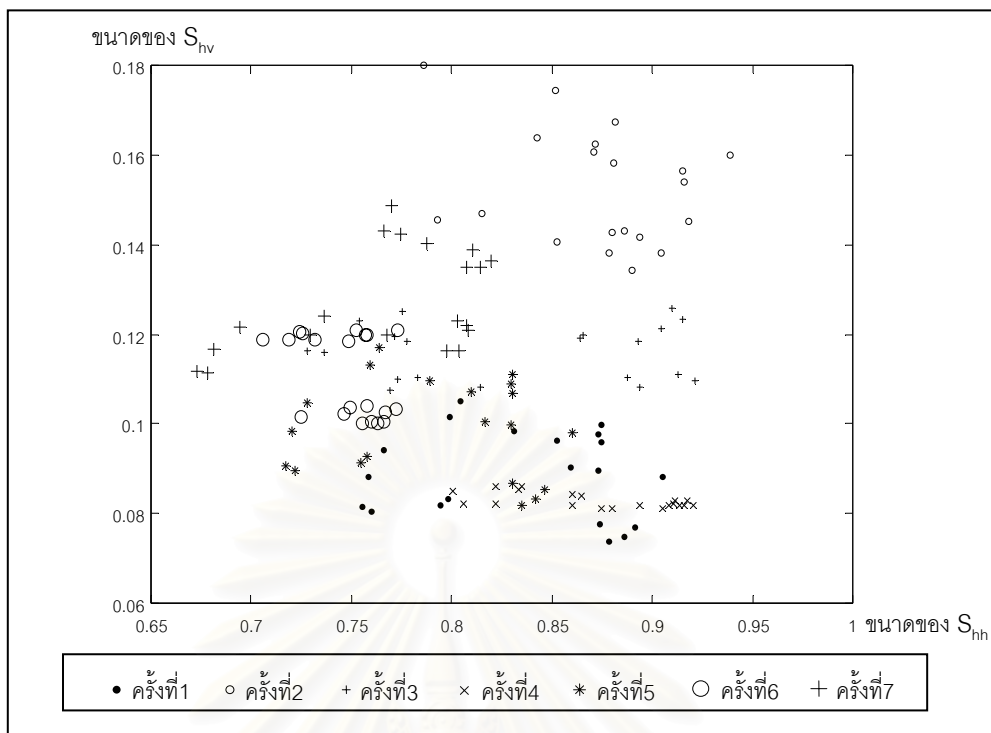
#### ดัชนีที่คำนวณได้จากการวัดโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่

ข้อมูลที่ได้จากการวัดโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงจะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้แสดงลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงของพืชไร่ โดยแต่ละตัวจะแสดงลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิงจากมุมมองที่ต่างกันไป เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วพบว่าตัวใดสามารถแยกข้อมูลจากการวัดออกเป็นกลุ่มตามสถานะการเจริญเติบโตที่ต่างกันได้จะนำพารามิเตอร์ตัวนั้นมาใช้เป็นดัชนีเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ โดยมีแนวทางที่ใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ 2 แนวทาง คือ การพิจารณาข้อมูลด้วยค่าทางสถิติและการพิจารณาลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลิ่นกระเจิง การพิจารณาข้อมูลด้วยค่าทางสถิติ คือ การพิจารณาข้อมูลของพืชไร่แต่ละชนิดด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยทางสถิติของข้อมูลเพื่อบอกความแตกต่างของพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ กัน ส่วนการพิจารณาลักษณะ

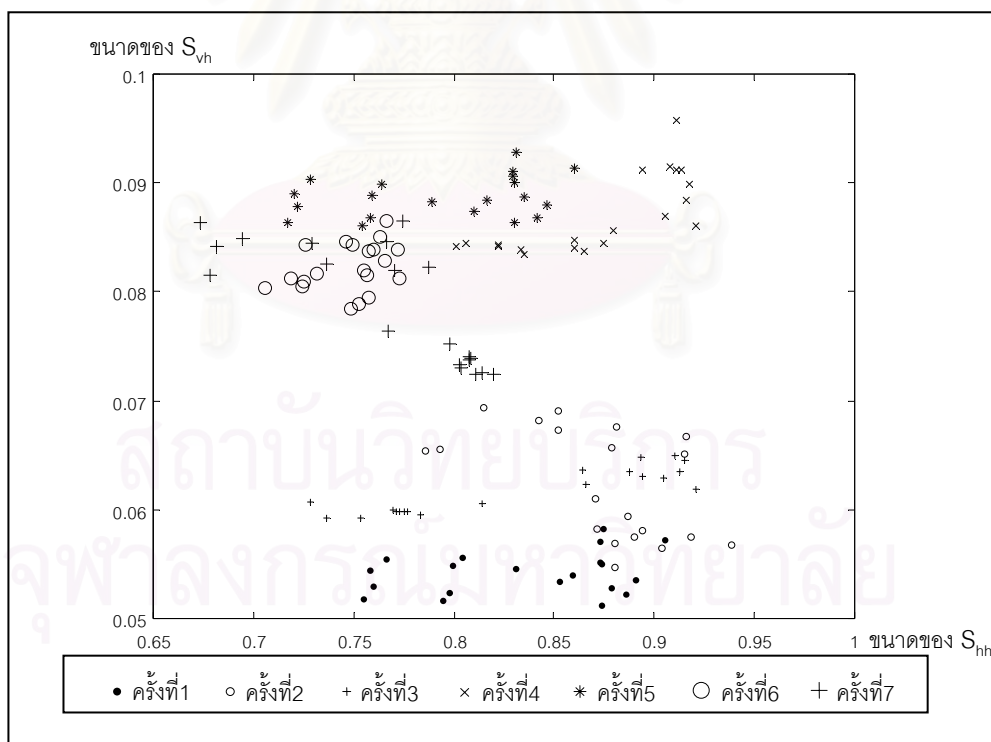
สมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง คือการพิจารณาลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงในแง่มุมต่างๆ อันได้แก่ ระดับพลังงานโพลาริเซชัน สถานะโพลาริเซชัน และความเข้มของพลังงานในแต่ละโพลาริเซชัน ผลจากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถเสนอดัชนีเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ 4 ดัชนีคือ 1. ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบเมทริกซ์การกระเจิงสององค์ประกอบร่วมกัน 2. ระดับชั้นโพลาริเซชัน 3. ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร และ 4. อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน โดยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบเมทริกซ์การกระเจิงสององค์ประกอบร่วมกันเป็นดัชนีที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลด้วยค่าทางสถิติ ส่วนดัชนีอื่นๆ ได้จากการพิจารณาลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง และแต่ละดัชนีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบเมทริกซ์การกระเจิงสององค์ประกอบร่วมกัน

ดัชนีพื้นฐานที่ใช้บอกสมบัติการกระเจิงของพืชไร่ คือ เมทริกซ์การกระเจิงที่มีองค์ประกอบทั้งสิ้น 4 องค์ประกอบอันได้แก่  $S_{hh}$ ,  $S_{hv}$ ,  $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  องค์ประกอบแต่ละอย่างสามารถบอกสมบัติการกระเจิงที่ต่างกันออกไป การพิจารณาข้อมูลเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ที่สถานะต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบเมทริกซ์การกระเจิงสององค์ประกอบร่วมกัน ซึ่งมีทั้งสิ้น 6 กรณี ดังนี้ 1. พิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน 2. พิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกัน 3. พิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน 4. พิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hv}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกัน 5. พิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hv}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน 6. พิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน โดยในแต่ละกรณีจะอธิบายความสัมพันธ์ของคลื่นกระเจิงในแนวโพลาริเซชันได้ต่างกัน ทั้ง 6 กรณีนี้ใช้พิจารณาสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง ทานตะวัน ข้าวโพดหวาน และพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน โดยแสดงผลการพิจารณาการเจริญเติบโตของถั่วลิสงทั้ง 6 กรณีดังรูปที่ 5.1 ส่วนผลการพิจารณาของทานตะวัน ข้าวโพดหวานและพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันเลือกแสดงเฉพาะกรณีที่พบว่าข้อมูลมีความน่าสนใจในการพิจารณาเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2-5.4 ตามลำดับ

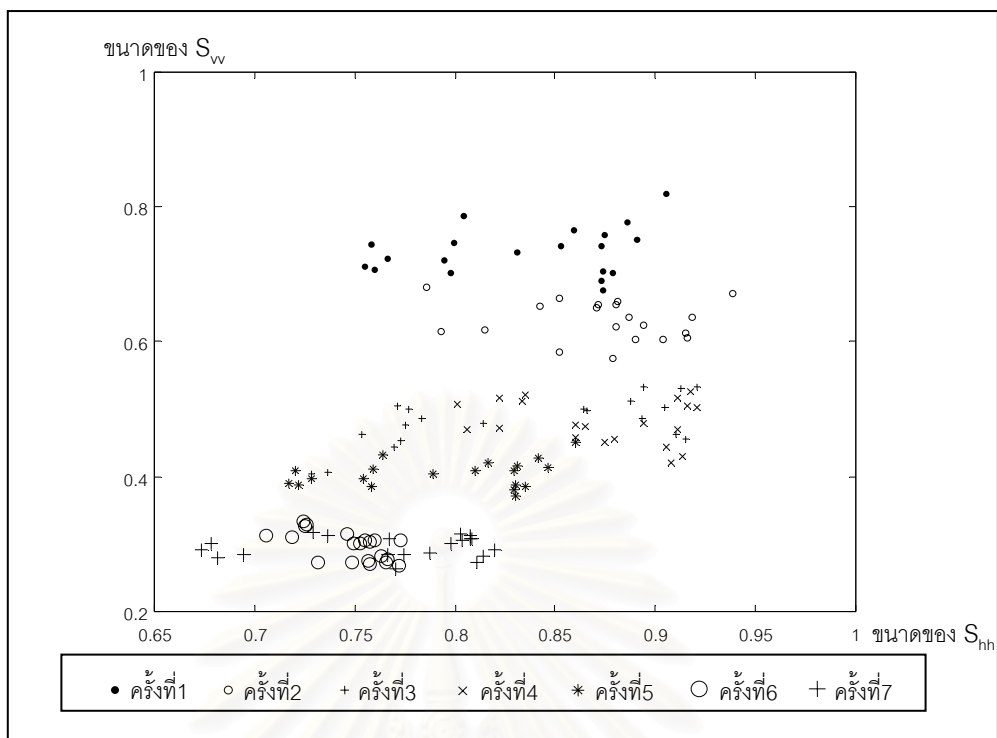


ก) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{hv}$  ร่วมกัน

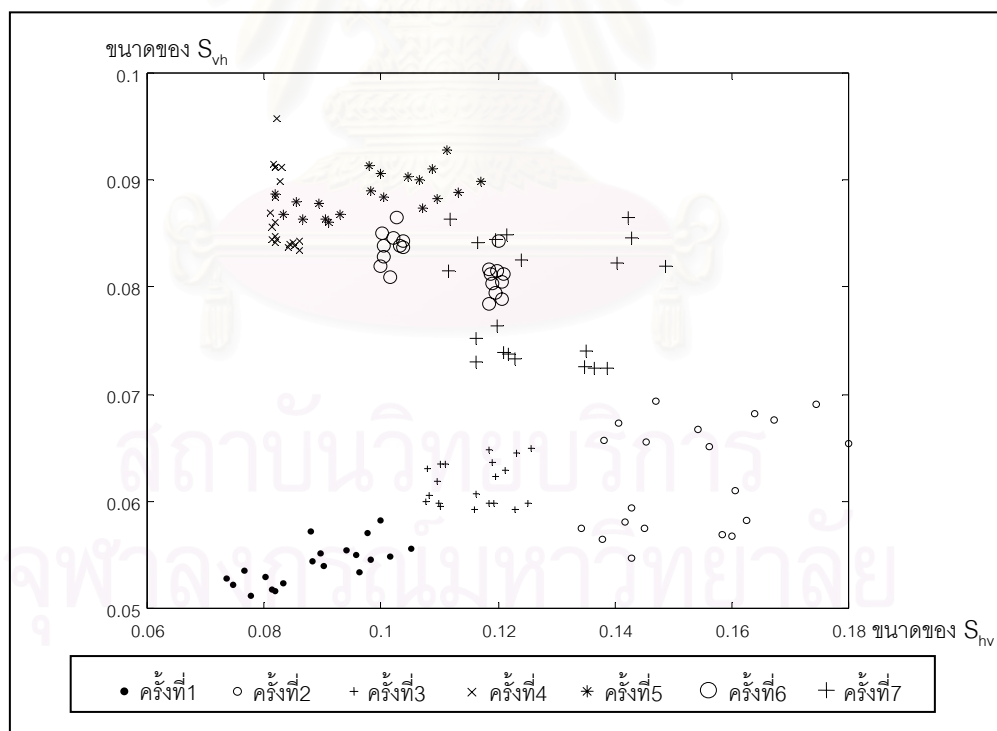


ข) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกัน

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของตัวลิสง



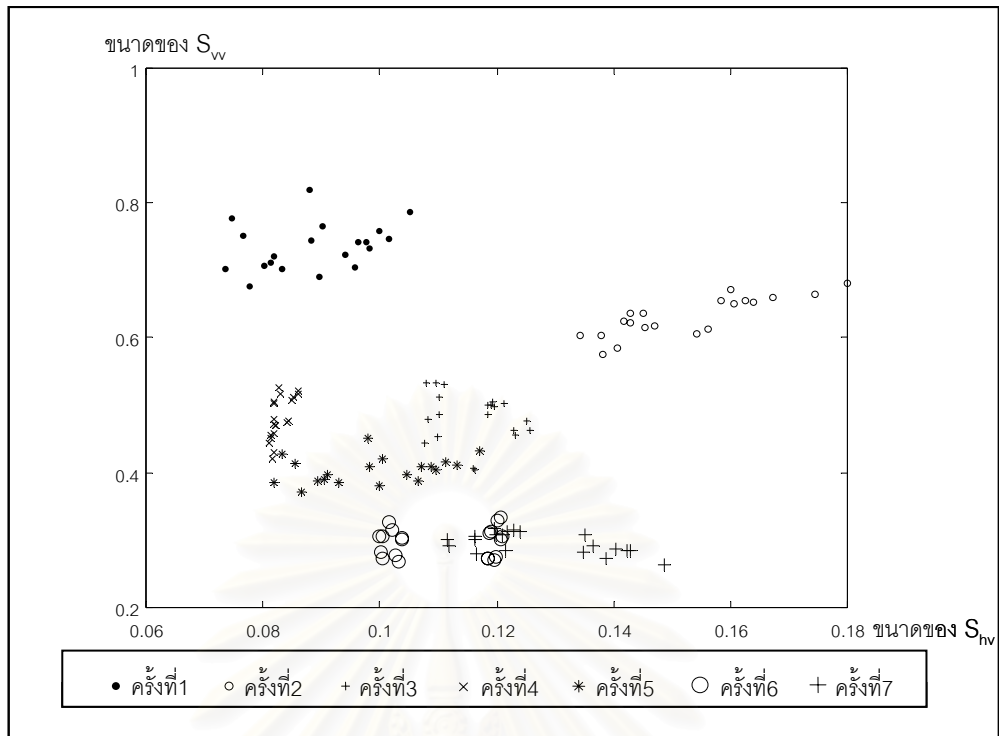
ค) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน



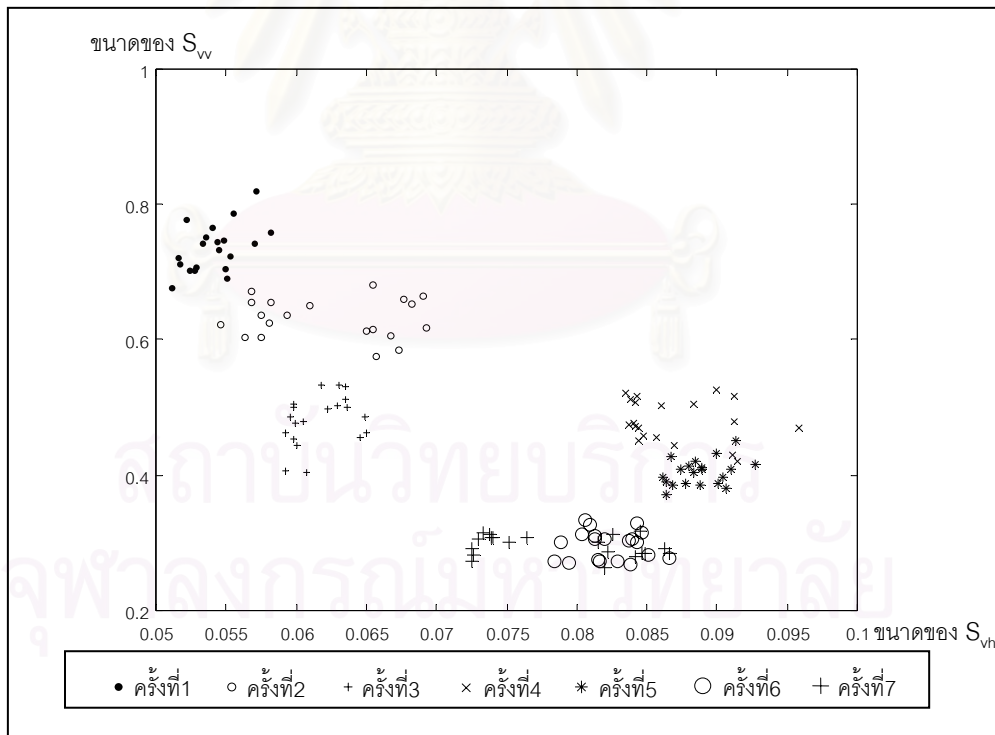
ง) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hv}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกัน

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของตัวลิส (ต่อ)



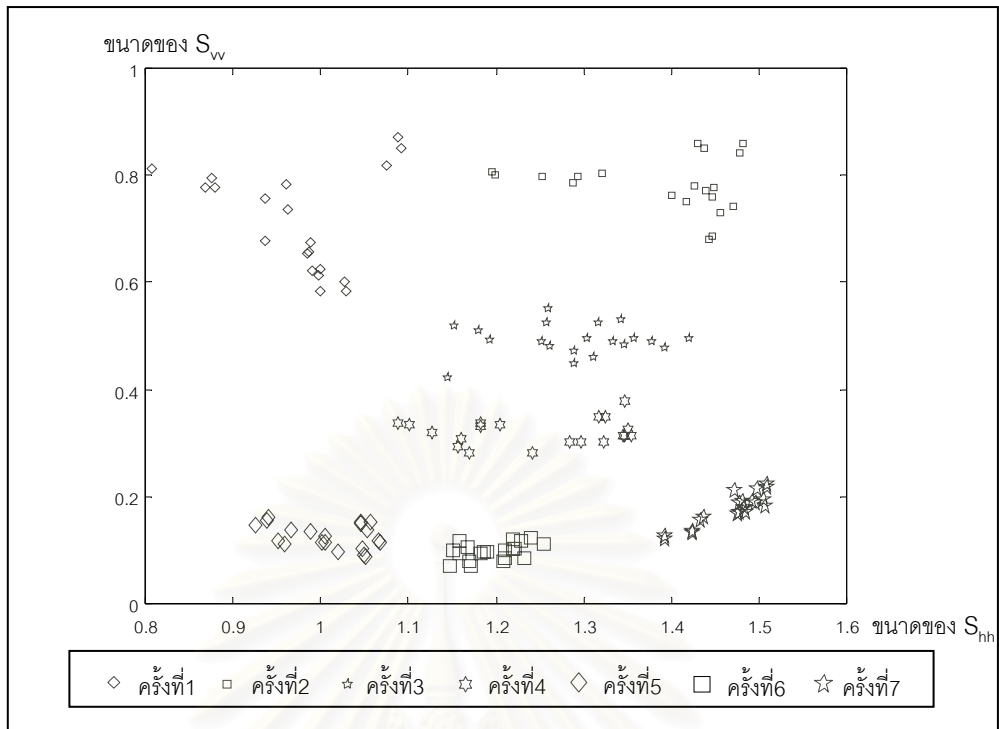


จ) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hv}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน

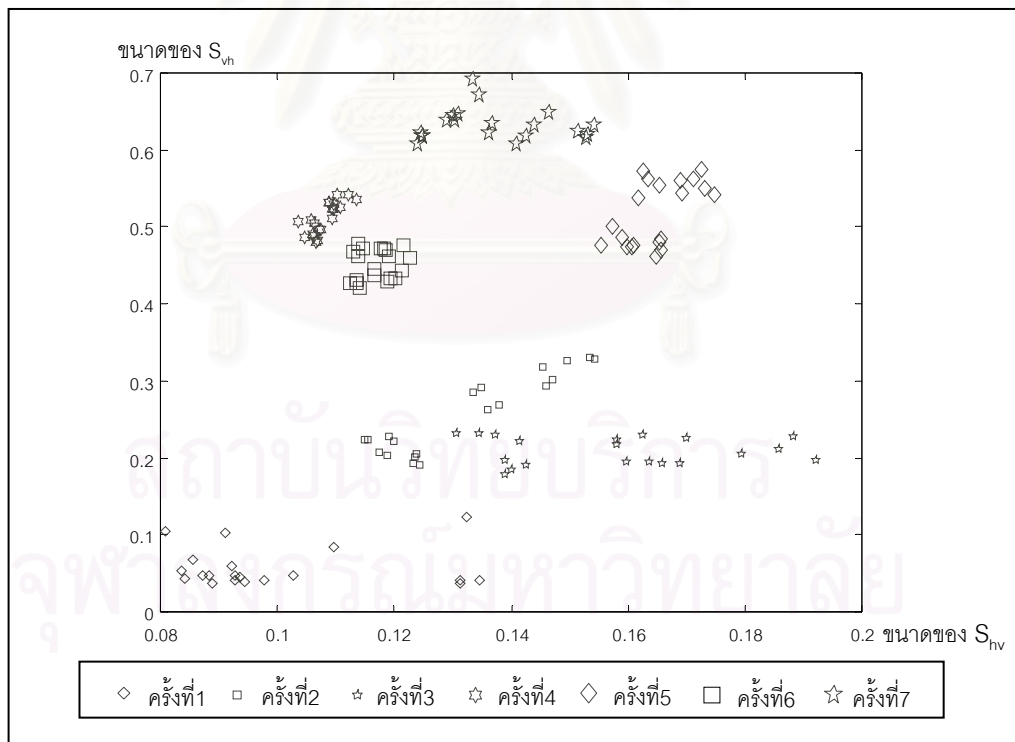


ฉ) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{vh}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน

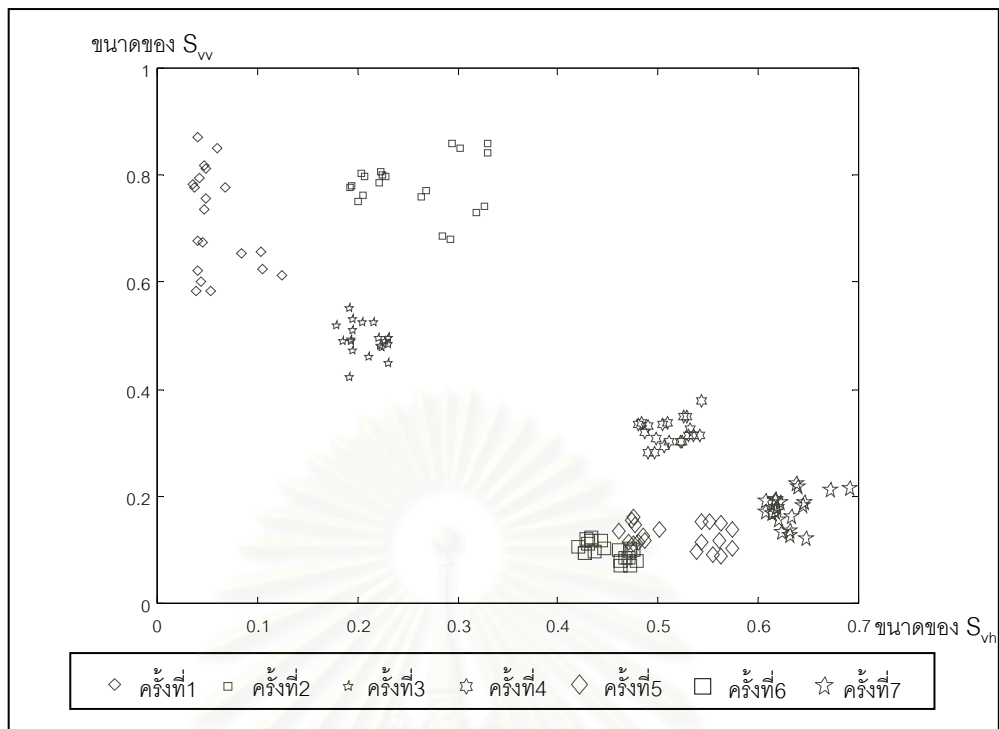
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของถั่วลิสง (ต่อ)



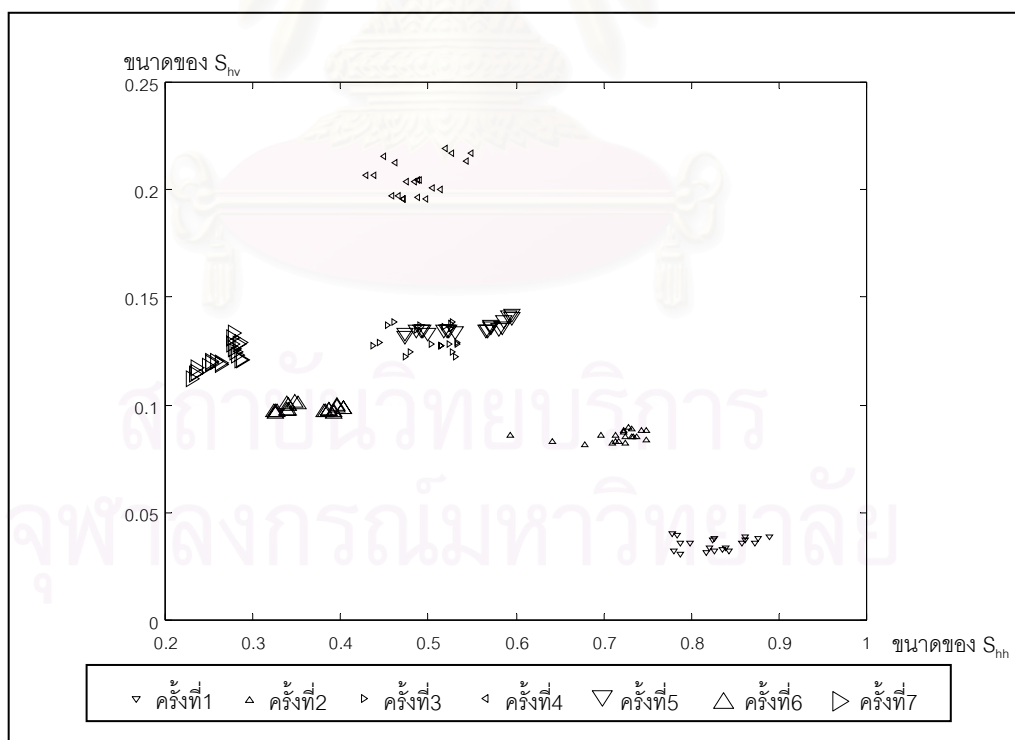
ก) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน



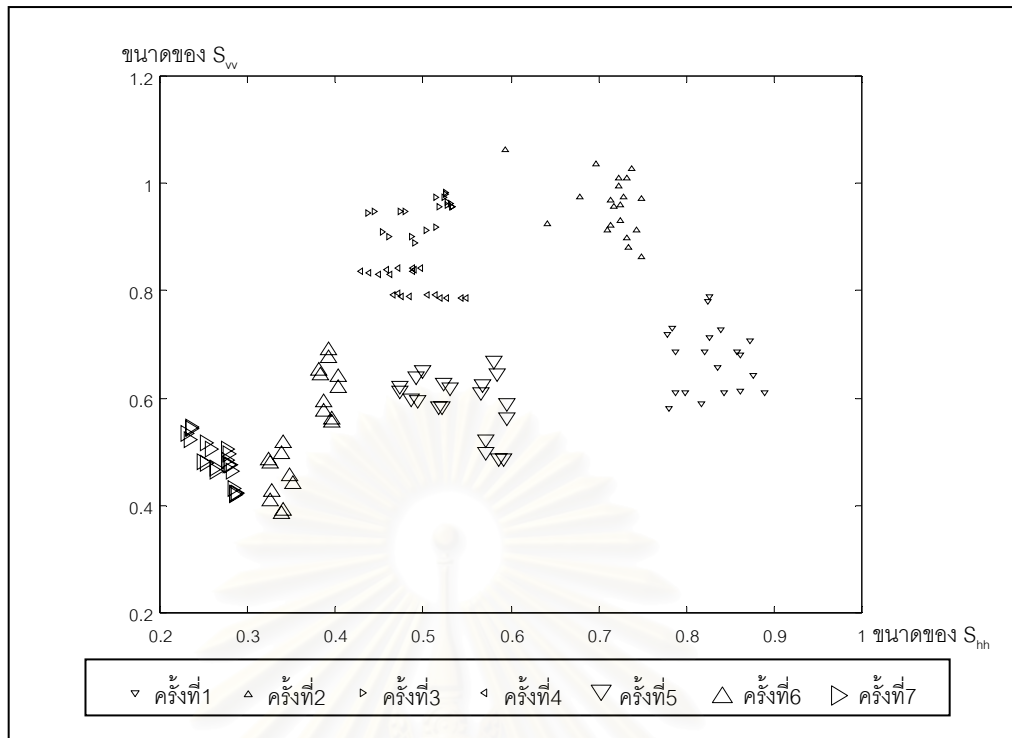
ข) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hv}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกัน  
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของทานตะวัน



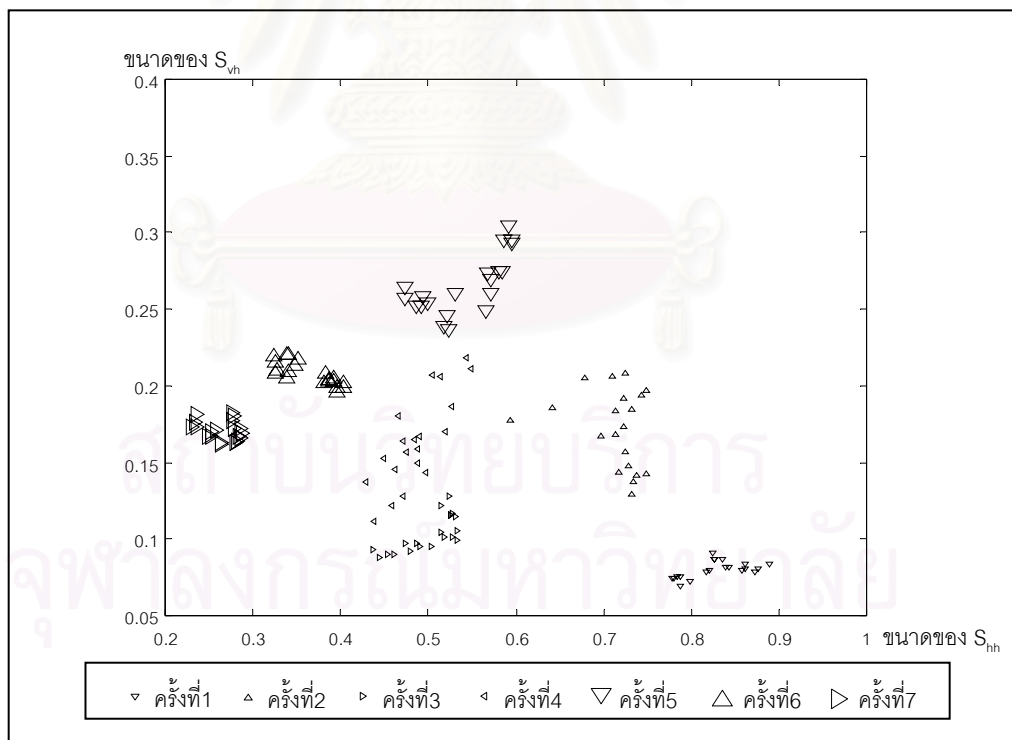
ค) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน  
 รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของทานตะวัน (ต่อ)



ก) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{hv}$  ร่วมกัน  
 รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของข้าวโพดหวาน

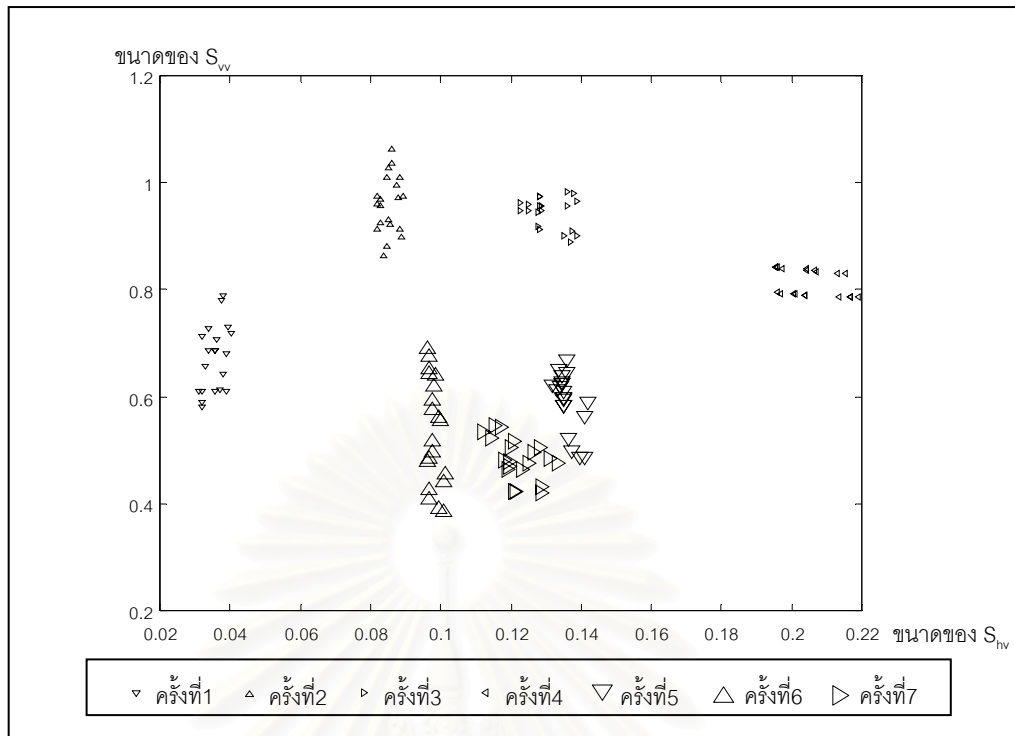


ข) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

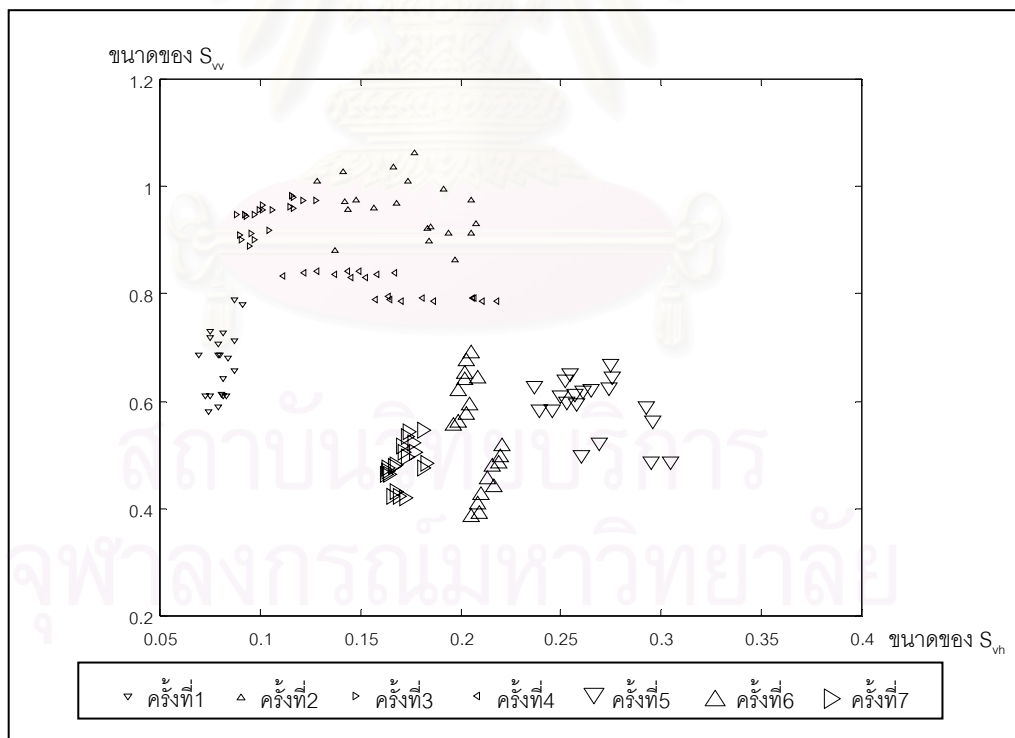


ค) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกัน

รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของข้าวโพดหวาน (ต่อ)



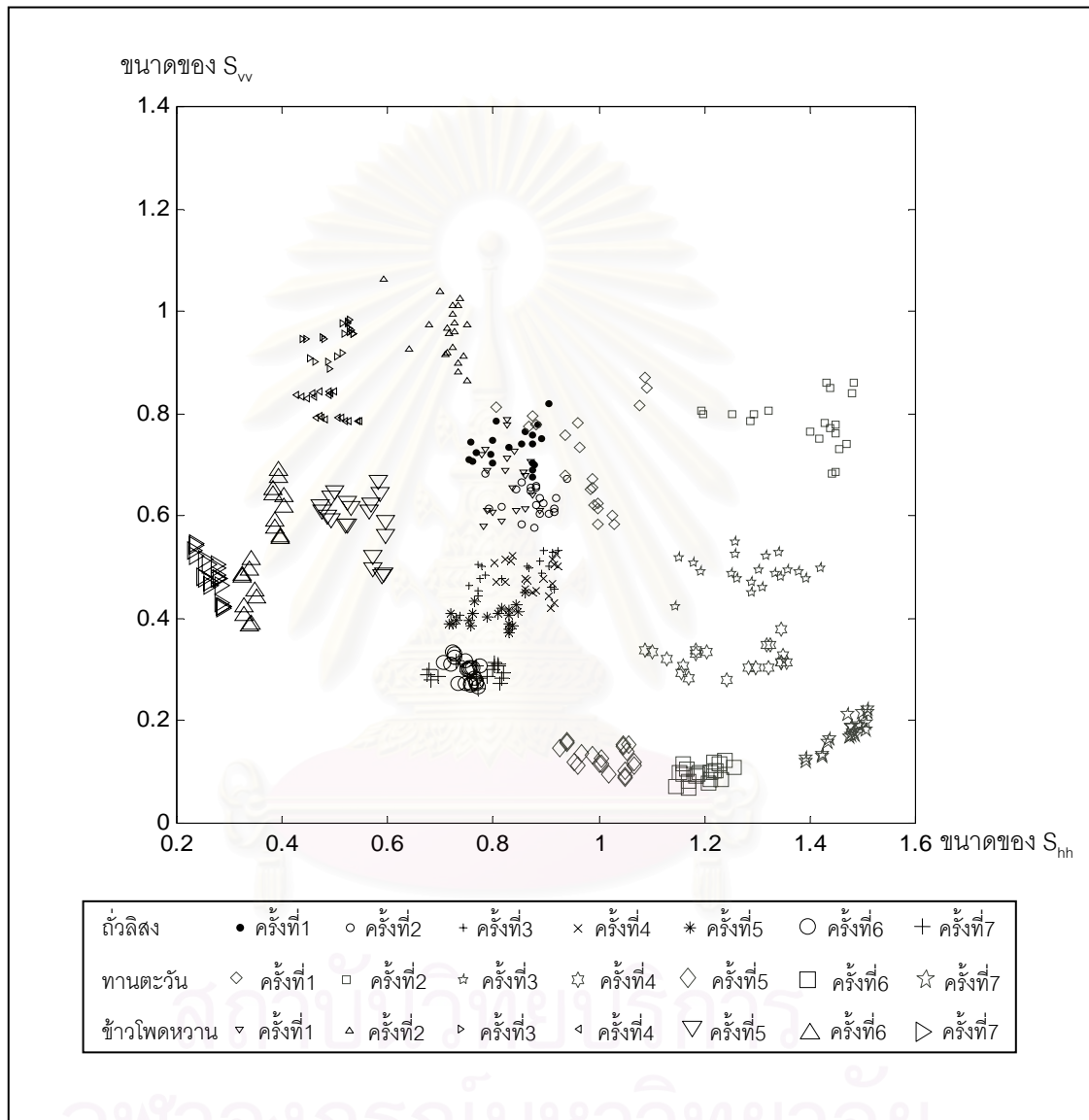
ง) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hv}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน



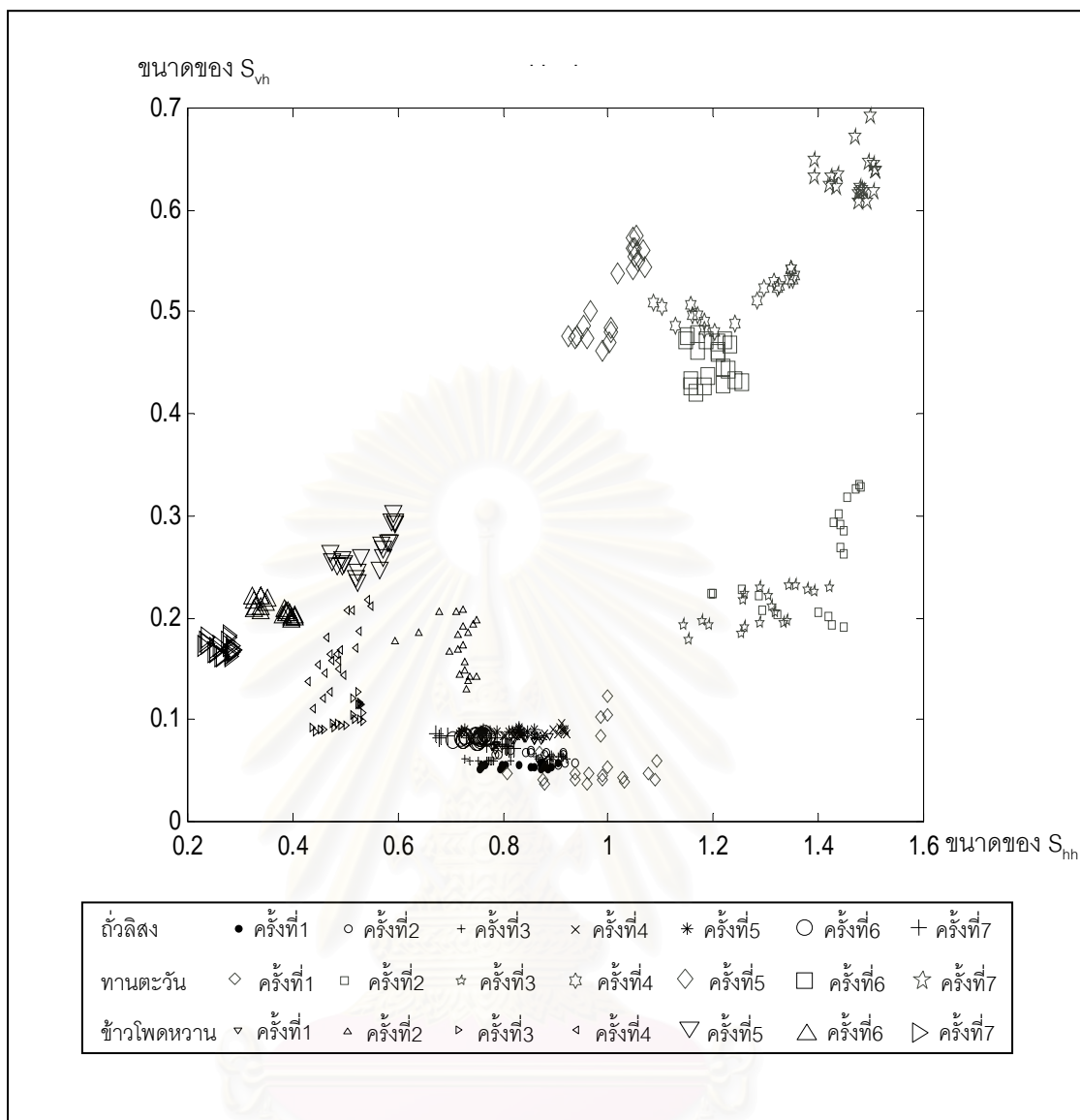
จ) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{vh}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน

รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของข้าวโพดหวาน (ต่อ)





ก) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน  
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด



ข) การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{nh}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกัน

รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสององค์ประกอบของพีชไร่ทั้ง 3 ชนิด (ต่อ)

เมื่อพิจารณาพีชไร่ที่ละชนิดด้วยวิธีนี้พบว่า มีขนาดและการกระจายตัวขององค์ประกอบ เมทริกซ์การกระจายต่างกัน ทำให้มีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชได้ไม่เท่ากัน จากรูปที่ 5.1ก ถึง 5.1ข พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่ของถั่วลิสงจากการวัดในครั้งที่อยู่ใกล้กันจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ไม่สามารถแยกสถานะได้ตามจำนวนครั้งที่วัดเก็บข้อมูล จึงต้องแยกข้อมูลออกจากกันด้วยการรวมข้อมูลครั้งที่อยู่ติดกันและไม่สามารถแยกออกจากกันได้เป็นกลุ่มเดียวกัน เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของเมทริกซ์การกระจายสององค์ประกอบรวมกันทั้ง 6 กรณีพบว่า สามารถแยกข้อมูลออกจากกันได้ด้วยการพิจารณา  $S_w$  โดย ขนาด  $S_w$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้น และสามารถแยกออกเป็น 4 กลุ่มตามสถานะการเจริญเติบโตที่ต่างกัน โดยแต่ละ

กลุ่มประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดดังนี้ กลุ่มที่ 1 เป็นข้อมูลจากครั้งที่ 1 กลุ่มที่ 2 เป็นข้อมูลจากครั้งที่ 2 กลุ่มที่ 3 เป็นข้อมูลจากครั้งที่ 3 4 และ 5 กลุ่มสุดท้ายเป็นข้อมูลจากครั้งที่ 6 และ 7 ส่วน  $S_{hh}$   $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  จากการวัดแต่ละครั้งส่วนใหญ่มีค่าทับซ้อนกัน จึงไม่สามารถแยกออกจากกันได้ อย่างชัดเจน ดังนั้นกรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.1ค กรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.1จ และกรณีพิจารณา  $S_{hv}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.1ข สามารถแยกได้ 4 กลุ่มตามค่า  $S_{vv}$  ดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนกรณีอื่นๆ ไม่พบสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการแยกข้อมูล เนื่องจากมีความสามารถในการแยกออกเป็นกลุ่มๆ ได้น้อยลงและไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ชัดเจน

จากรูปที่ 5.2ก-5.2ค พบว่าเมื่อทานตะวันมีอายุมากขึ้นองค์ประกอบของเมทริกซ์การกระเจิงในแต่ละครั้งมีการเกาะกลุ่มกันมากขึ้น และแยกออกจากครั้งอื่นๆ จึงทำให้สามารถแยกออกเป็นกลุ่มได้ง่ายและชัดเจนกว่าถั่วลิสง โดยเฉพาะกรณีการพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.2ก จะสามารถแยกข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้งออกจากกันได้ชัดเจนที่สุด กรณีพิจารณา  $S_{hv}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.2ข และกรณีพิจารณา  $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.2ค สามารถแยกข้อมูลได้ออกเป็น 6 กลุ่มเหมือนกัน แต่มีรายละเอียดการแยกกลุ่มต่างกัน และมีจุดที่น่าสนใจคือ ข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1, 2 และ 3 กับข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4, 5, 6 และ 7 จะมีค่าแตกต่างกัน และแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ส่วนกรณีอื่นๆ ไม่พบสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการพิจารณา เนื่องจากมีความสามารถในการแยกเป็นกลุ่มได้น้อยลง หรือบางกรณีแยกไม่ได้เลยเพราะมีการทับซ้อนกันของข้อมูลจากการวัดในครั้งที่ไม่อยู่ติดกัน ซึ่งแม้จะแยกกลุ่มได้แต่ก็ไม่สามารถนำไปติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้

จากรูปที่ 5.3ก ถึง 5.3จ พบว่าสามารถติดตามการเจริญเติบโตข้าวโพดหวานด้วยวิธีนี้ได้ ดีกว่าถั่วลิสงและทานตะวัน โดยกรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.3ก และ กรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.3ข สามารถแยกออกเป็นกลุ่มได้ตามข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้ง แต่กรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันจะให้ผลการแยกกลุ่มที่มีความถูกต้องมากกว่า ส่วนกรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.3ค กรณีพิจารณา  $S_{hv}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.3ง และกรณีพิจารณา  $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.3จ สามารถแยกข้อมูลได้เป็น 6 กลุ่มเท่ากันแต่มีรายละเอียดในการแยกกลุ่มต่างกัน ส่วนการพิจารณา  $S_{vh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน ไม่พบสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการแยกกลุ่มข้อมูลเนื่องจากมีความสามารถในการแยกเป็นกลุ่มได้น้อยลง และมีการทับซ้อนกันของข้อมูลจากการวัดในครั้งที่ไม่อยู่ติดกัน

เมื่อพิจารณาพีชไรท์ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันพบว่ามีความถี่พิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.4ก เท่านั้นที่สามารถใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพีชไรท์ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันได้เพราะข้อมูลของพีชไรท์แต่ละชนิดสามารถแยกออกจากกันได้ ยกเว้นข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1 เท่านั้นที่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ เนื่องจากเป็นการวัดในขณะที่พีชไรท์อยู่ในช่วงต้นอ่อนซึ่งมีขนาดเล็ก ผลการวัดจึงได้รับอิทธิพลมาจากดินเป็นส่วนใหญ่ ค่าที่ได้จึงใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vh}$  ร่วมกันตามรูปที่ 5.4ข แม้จะมีความสามารถในการติดตามการเจริญเติบโตของพีชไรท์แต่ละชนิดน้อยกว่ากรณีพิจารณา  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน แต่กรณีนี้มีความสามารถในการแยกพีชไรท์ทั้ง 3 ชนิดออกจากกันได้ชัดเจนที่สุดหากเริ่มพิจารณาตั้งแต่การวัดครั้งที่ 2 จนถึงครั้งที่ 7 ส่วนกรณีอื่นๆ ไม่สามารถติดตามการเจริญเติบโตของพีชไรท์ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันได้ เนื่องจากข้อมูลของพีชไรท์ที่สถานะการเจริญเติบโตหนึ่งไปทับซ้อนกับข้อมูลของพีชไรท์อีกชนิดหนึ่งที่ต่างสถานะการเจริญเติบโตกัน จึงทำให้ไม่สามารถตัดสินได้ว่าเป็นพีชชนิดใด

### ระดับชั้นโพลาริเซชัน

การพิจารณาลักษณะสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการพิจารณาเพื่อแยกประเภทเป้า เพราะข้อมูลจากการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงสามารถแสดงสถานะโพลาริเซชันของคลื่นที่กระเจิงกลับจากพีชไรท์ได้อย่างสมบูรณ์ ระดับชั้นโพลาริเซชันเป็นปริมาณอย่างหนึ่งที่สามารถบอกสมบัติโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงได้ ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และแสดงด้วยสมการที่ (2.20) ระดับชั้นโพลาริเซชันจะบอกถึงพลังงานของคลื่นที่มีโพลาริเซชันเทียบกับพลังงานของคลื่นทั้งหมดที่วัดได้ ถ้าค่าระดับชั้นโพลาริเซชันเข้าใกล้ 1 แสดงว่าคลื่นกระเจิงมีโพลาริเซชันอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าเข้าใกล้ 0 คลื่นกระเจิงนั้นจะไม่มีโพลาริเซชันอย่างสมบูรณ์ ข้อมูลจากการวัดด้วยระบบวัดที่พัฒนาขึ้นมีการส่งคลื่นตกกระทบใน 2 กรณีคือ คลื่นตกกระทบในแนว H และ V ดังนั้นการพิจารณาระดับชั้นโพลาริเซชันจึงต้องแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณีตามแนวคลื่นตกกระทบ คือ

1. ระดับชั้นโพลาริเซชันเมื่อส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว H ( $d_h$ ) จากสมการที่ (2.11) จะสามารถหาค่า  $E_h$  และ  $E_v$  ของคลื่นกระเจิงกลับในกรณีส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว H ได้ดังนี้

$$E_h = E_h' = \frac{e^{jkr}}{r} (S_{hh}) E_h' \quad (5.1ก)$$

$$\mathbf{E}_v = \mathbf{E}_v^r = \frac{e^{jkr}}{r} (\mathbf{S}_{vh}) \mathbf{E}_h^t \quad (5.1ข)$$

จากนั้นนำค่า  $\mathbf{E}_h$  และ  $\mathbf{E}_v$  ที่ได้ไปหาค่าสโตกส์พารามิเตอร์ตามสมการที่ (2.17) เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าระดับชั้นโพลาไรเซชันเมื่อส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว H ( $d_h$ )

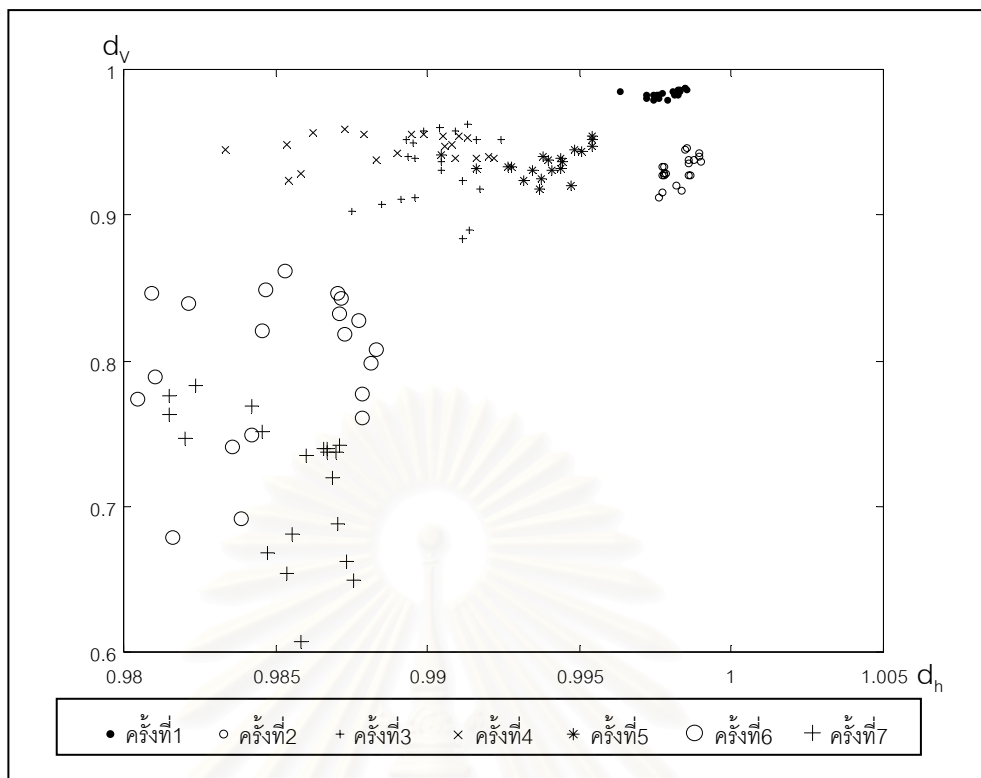
2. ระดับชั้นโพลาไรเซชันเมื่อส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว V ( $d_v$ ) พิจารณาเช่นเดียวกับกรณีส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว V แต่ค่า  $\mathbf{E}_h$  และ  $\mathbf{E}_v$  ของคลื่นกระเจิงกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (5.1ค) และ (5.1ง) ตามลำดับ

$$\mathbf{E}_h = \mathbf{E}_h^r = \frac{e^{jkr}}{r} (\mathbf{S}_{hv}) \mathbf{E}_v^t \quad (5.1ค)$$

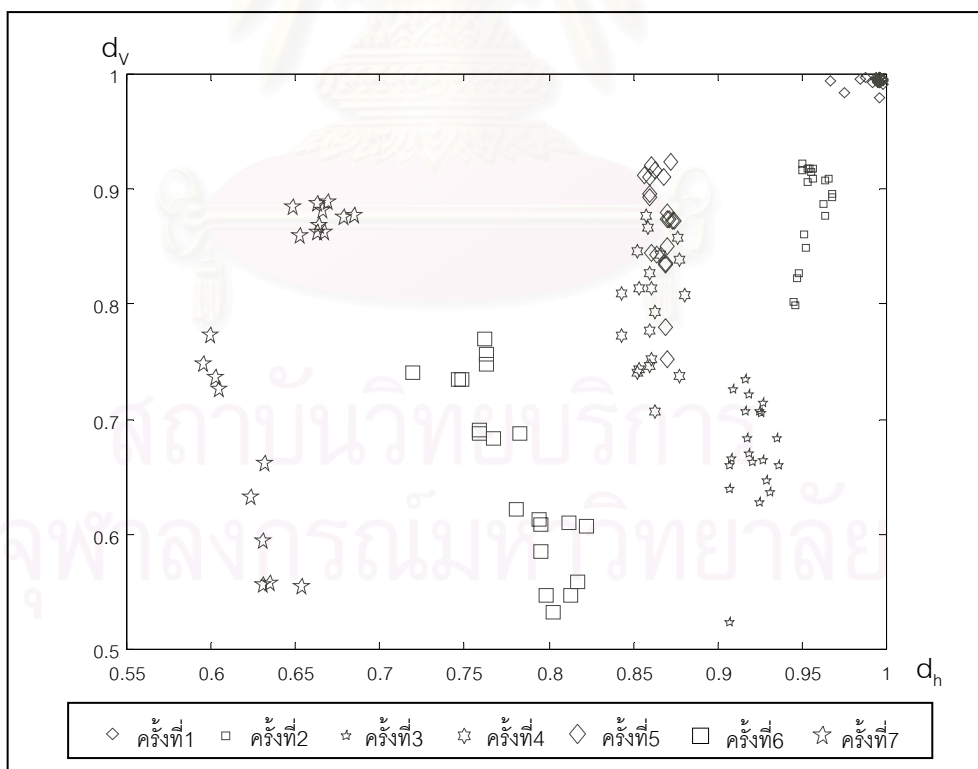
$$\mathbf{E}_v = \mathbf{E}_v^r = \frac{e^{jkr}}{r} (\mathbf{S}_{vv}) \mathbf{E}_v^t \quad (5.1ง)$$

การพิจารณาระดับชั้นโพลาไรเซชันของการส่งคลื่นตกกระทบทั้ง 2 แนว H และ V ( $d_h$  และ  $d_v$ ) ร่วมกันเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวาน สามารถแสดงในรูปที่ 5.5 ถึง 5.7 และเมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน สามารถแสดงในรูปที่ 5.8

จากรูปที่ 5.5 พบว่าไม่สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงจากการค่า  $d_h$  ได้ เพราะมีการกระจายน้อยมาก แต่ค่า  $d_v$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้น ทำให้สามารถแยกข้อมูลกลุ่มเป็น 3 กลุ่มตามค่า  $d_v$  โดยกลุ่มที่ 1 เป็นข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1 กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2 3 4 และ 5 กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6 และ 7 ตามลำดับ โดยแต่ละกลุ่มมีค่า  $d_v$  อยู่ในช่วง 0.97 ถึง 0.99 0.89 ถึง 0.97 และ 0.60 ถึง 0.87 ตามลำดับ

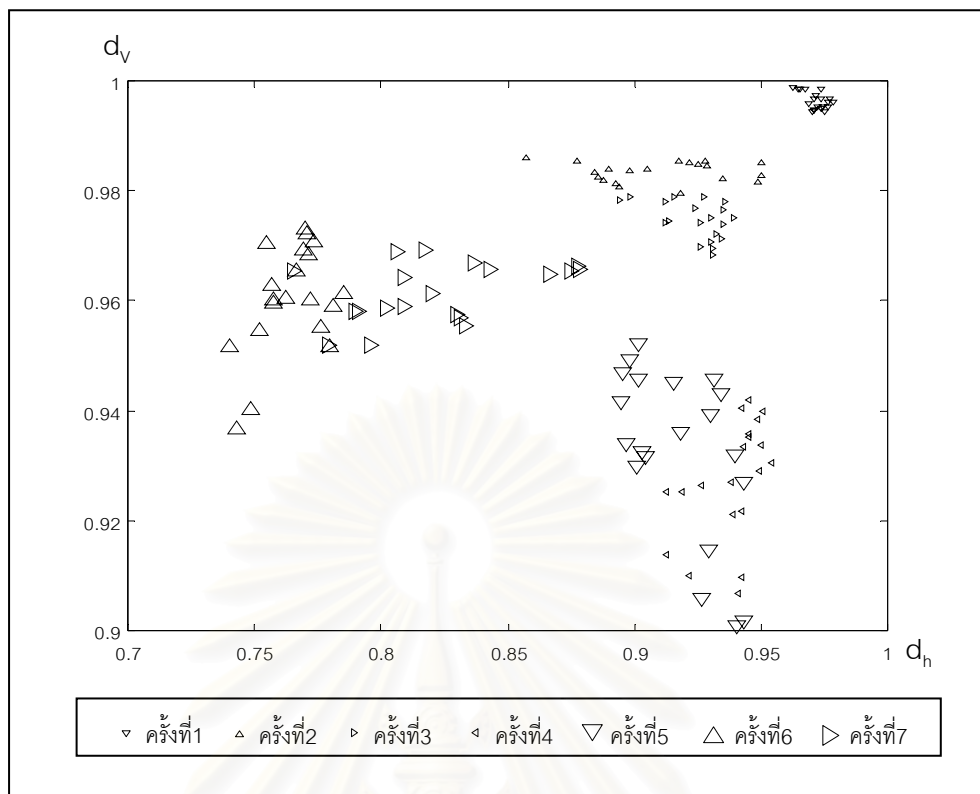


รูปที่ 5.5 ระดับชั้นโพลาริเซชันของถั่วลิสง



รูปที่ 5.6 ระดับชั้นโพลาริเซชันของทานตะวัน

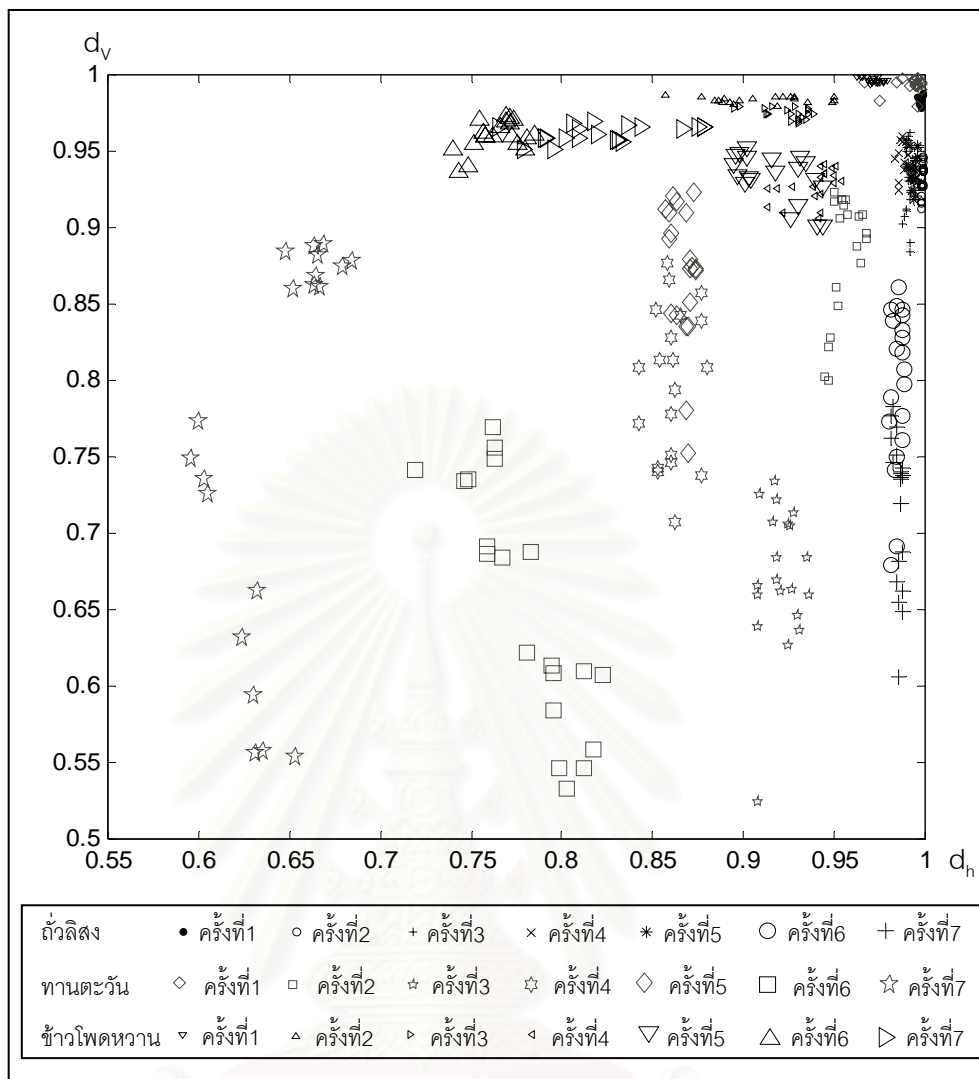




รูปที่ 5.7 ระดับชั้นโพลาริเซชันของข้าวโพดหวาน

จากรูปที่ 5.6 พบว่าแม้ค่า  $d_h$  และ  $d_v$  ของทานตะวันจะมีการกระจายมากกว่าถั่วลิสงและข้าวโพดหวานและมีแนวโน้มการกระจายตัวมากขึ้นเมื่อทานตะวันมีอายุมากขึ้น แต่ข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้งเกาะกลุ่มกันและแยกจากกลุ่มอื่นๆ จึงทำให้สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ดีกว่าถั่วลิสงและข้าวโพดหวาน คือสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ 6 สถานะ แต่ละสถานะแทนข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้งยกเว้นข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4 และครั้งที่ 5 ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ จึงรวมเป็นสถานะเดียวกัน

จากรูปที่ 5.7 พบว่าข้าวโพดหวานมีค่า  $d_v$  สูงและมีการกระจายน้อยกว่าถั่วลิสงและทานตะวันมาก แต่เมื่อพิจารณาค่า  $d_h$  และ  $d_v$  ร่วมกันสามารถแยกกลุ่มของข้อมูลจากการวัดได้เป็น 5 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 เป็นข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1 กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2 และ 3 กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4 และ 5 กลุ่มที่ 4 เป็นข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6 และกลุ่มที่ 5 เป็นข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 7 ตามลำดับ



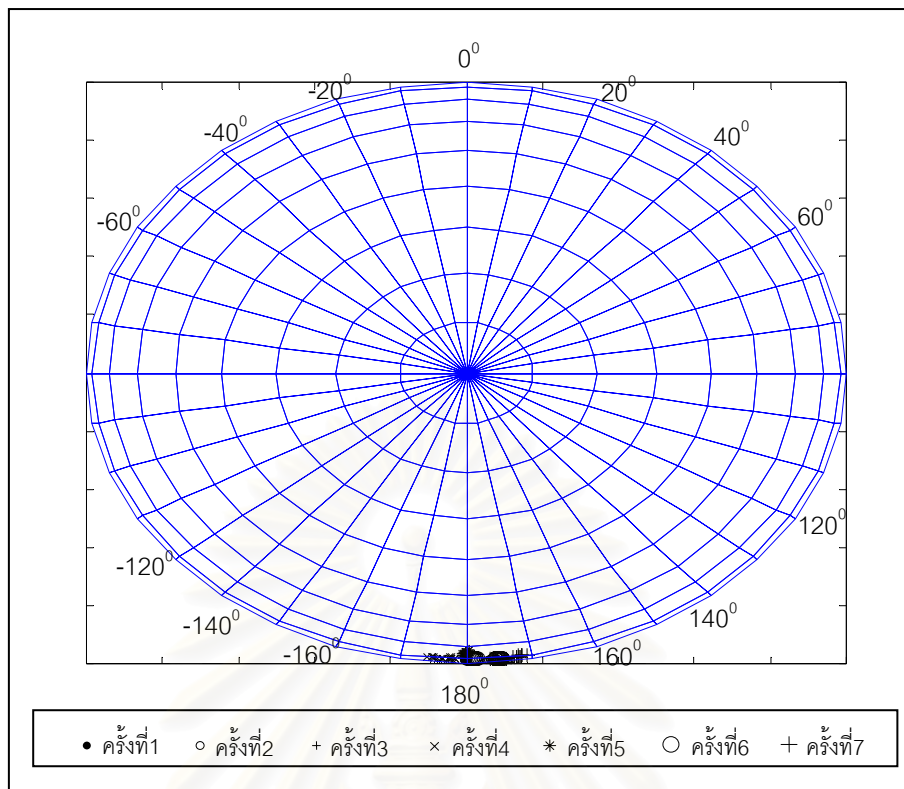
รูปที่ 5.8 ระดับชั้นโพลาริเซชันของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด

จากรูปที่ 5.8 พบว่าการพิจารณา  $d_n$  และ  $d_v$  ร่วมกันสามารถแยกประเภทพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด ออกจากกันได้ โดยข้าวเหนียวมีค่า  $d_n$  สูงและมีการกระจายน้อยมาก อยู่ในช่วง 0.98 ถึง 1.00 ค่า  $d_v$  อยู่ในช่วง 0.60 ถึง 1.00 ขณะที่ข้าวโพดหวานมีการกระจายของค่า  $d_n$  มากกว่าข้าวเหนียว โดยอยู่ในช่วง 0.74-0.97 แต่มีค่า  $d_v$  ที่สูงและมีการกระจายน้อยที่สุดและมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.90-0.99 ส่วนข้าวหอมมะลิมีการกระจายของค่า  $d_n$  และ  $d_v$  มากกว่าข้าวเหนียวและข้าวโพดหวานแต่ก็สามารถแยกออกจากข้าวเหนียวและข้าวโพดหวานได้

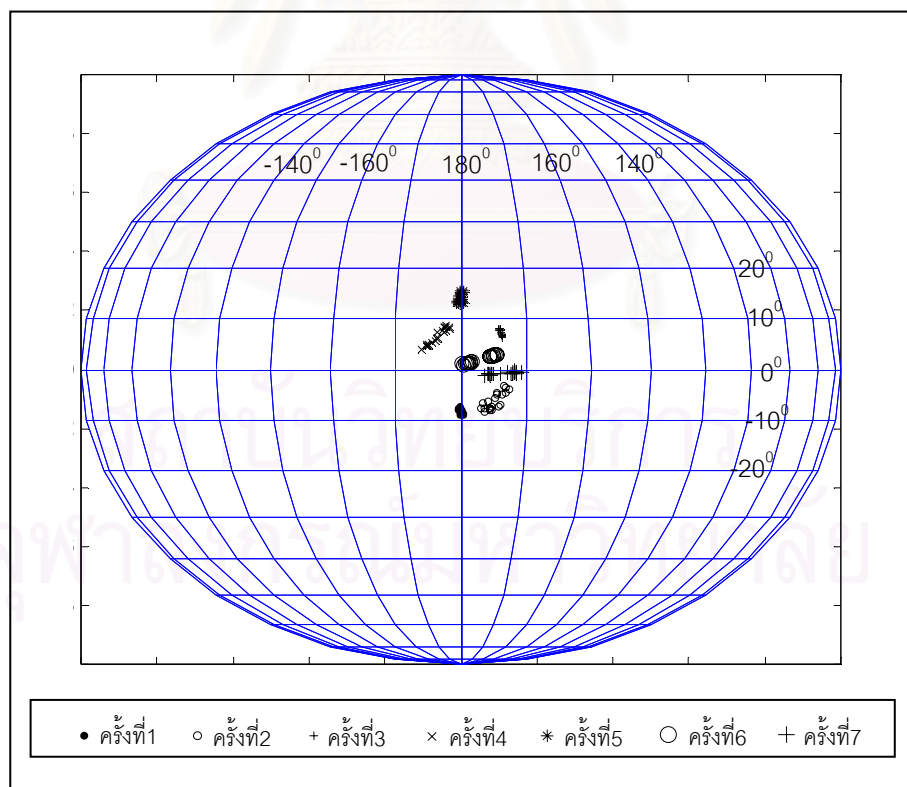
### ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร

การพิจารณาตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรจะพิจารณาได้ 2 กรณี คือ 1. กรณีเมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว H และ 2. กรณีเมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว V การพิจารณาดำแหน่งต่างๆ บนทรงกลมปวงกาเรเป็นการพิจารณาในรูปสามมิติซึ่งไม่สะดวก ดังนั้นจึงเปลี่ยนจากการพิจารณาครั้งเดียวทั้งสามมิติมาเป็นการพิจารณาด้วยระนาบสองระนาบ โดยสร้างจากการฉายเงาของตำแหน่งบนทรงกลมปวงกาเรลงบนระนาบสองมิติ และสามารถอธิบายตำแหน่งบนทรงกลมปวงกาเรได้เช่นเดียวกัน แต่สามารถพิจารณาข้อมูลได้ง่ายและชัดเจนกว่า ระนาบทั้งสองที่ใช้ในการพิจารณาได้แก่ระนาบ YX และระนาบ YZ การพิจารณาบนระนาบ YX สามารถพิจารณาค่าความเอียงของวงรีโพลาริเซชันได้อย่างชัดเจน โดยพิจารณาจากค่าของเส้นลวงจิจูดซึ่งเป็นเส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลางไปตามแนวรัศมีของวงกลม กำหนดให้เส้นที่ลากจากจุดศูนย์กลางไปยังจุด  $Y=0$  และ  $X=1$  เป็นเส้นลวงจิจูด 0 องศา เมื่อค่ามุมของเส้นลวงจิจูดเปลี่ยนไป ค่าความเอียงของวงรีก็จะเปลี่ยนไป เช่น ที่เส้นลวงจิจูด 0 องศา คลื่นจะมีโพลาริเซชันในแนว V หรือ ที่เส้นลวงจิจูด 180 องศา คลื่นจะมี โพลาริเซชันในแนว H การพิจารณาบนระนาบ YZ สามารถพิจารณาสัดส่วนรูปร่างและลักษณะการหมุนของวงรีโพลาริเซชันได้อย่างชัดเจน โดยพิจารณาจากเส้นละติจูด ซึ่งพิจารณาได้อย่าง ชัดเจนบนระนาบนี้โดยเป็นเส้นตรงที่ลากขนานกับแกน Y โดยเส้นตรงที่ลากผ่านจุดศูนย์กลางในแนวระดับเป็นเส้นละติจูด 0 องศา ( $Z=0$ ) ค่ามุมของเส้นละติจูดสามารถพิจารณาจากค่าของแกน Z บนระนาบนี้ การพิจารณาการหมุนของวงรีโพลาริเซชันพิจารณาจากเส้นละติจูดหรือค่า Z เมื่อ  $Z > 0$  จะหมุนวนทางซ้าย และเมื่อ  $Z < 0$  จะหมุนวนทางขวา การพิจารณาสัดส่วนของวงรีโดยดูจากค่า Z เมื่อ  $Z=0$  จะมีโพลาริเซชันเป็นเส้นตรง และเมื่อ  $|Z|$  มากขึ้นหรือเส้นละติจูดสูงขึ้นค่า ความรีของวงรีจะมีค่าลดลงจนเมื่อค่า  $Z=1$  คลื่นจะมีโพลาริเซชันแบบวงกลมหมุนทางซ้าย แต่เมื่อ  $Z=-1$  คลื่นจะมีโพลาริเซชันแบบวงกลมหมุนทางขวา

ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร เมื่อส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว H ของ ถั่วลิสง ทานตะวัน ข้าวโพดหวาน และพีชไว้ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 ถึง 5.12 ตามลำดับ และเมื่อส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว V สามารถแสดงตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของพีชไว้ทั้ง 3 ชนิดได้ดังรูปที่ 5.13

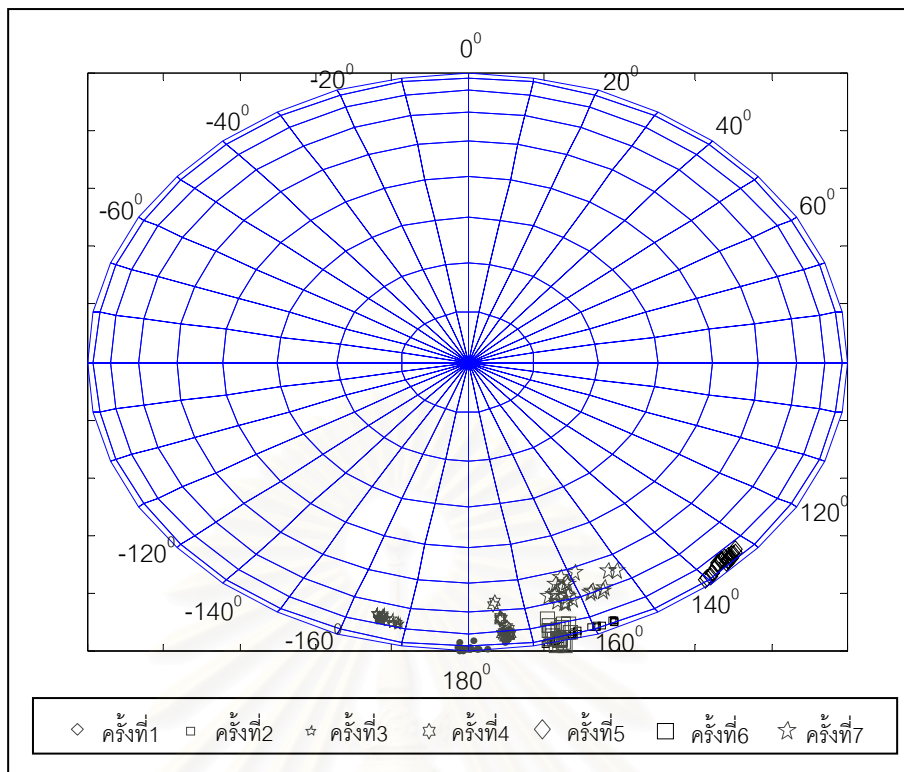


ก) ระนาบ YX เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H

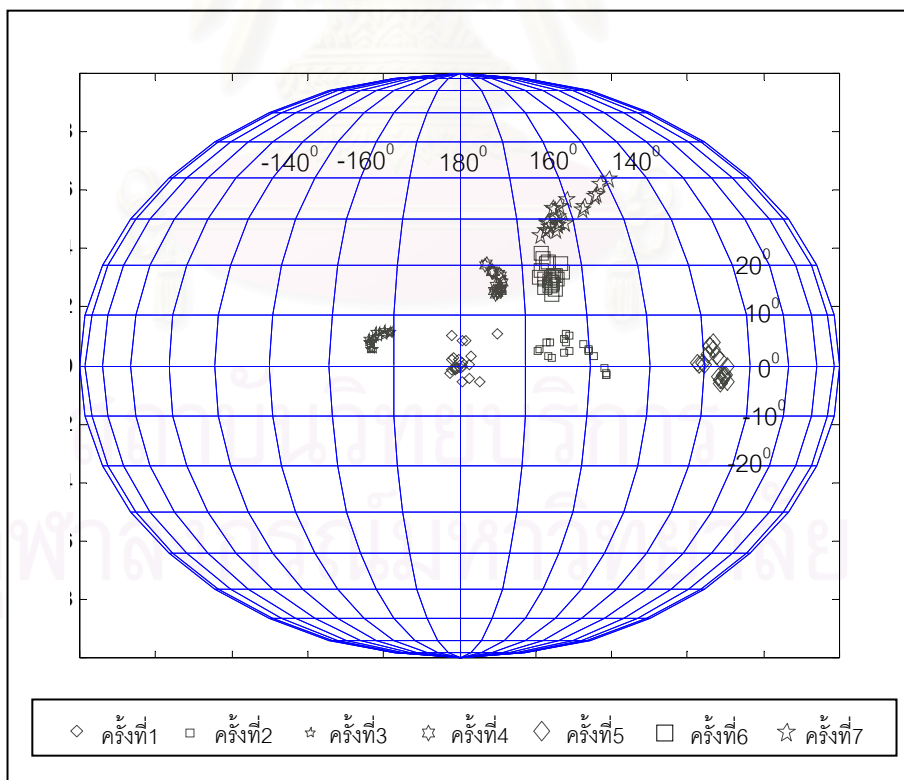


ข) ระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H

รูปที่ 5.9 ตำแหน่งของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของถั่วลิสง

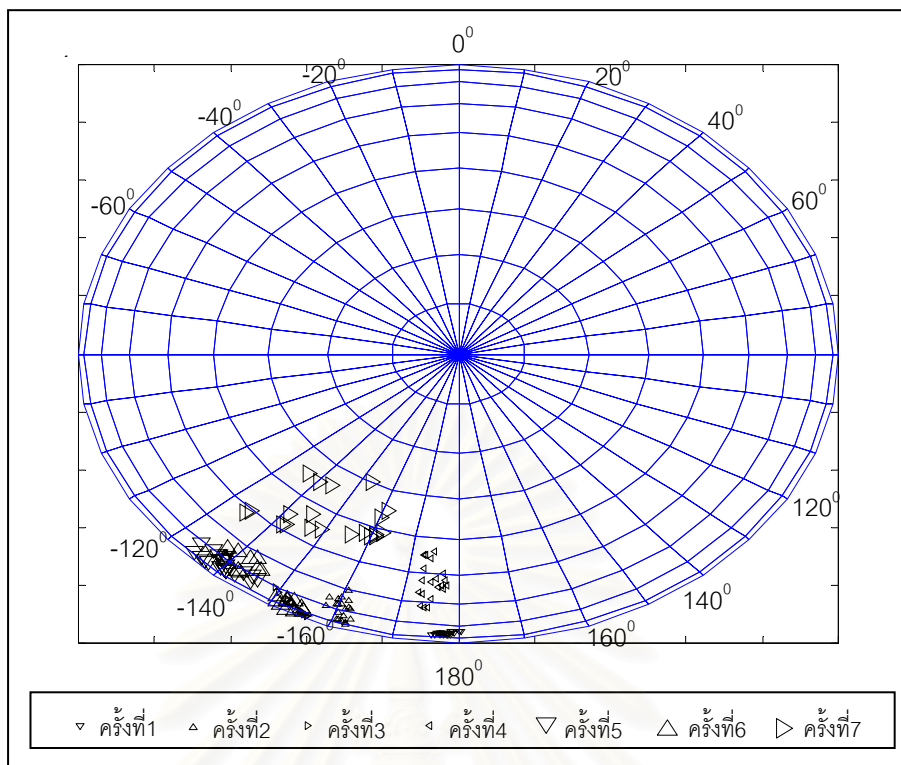


ก) ระนาบ YX เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H

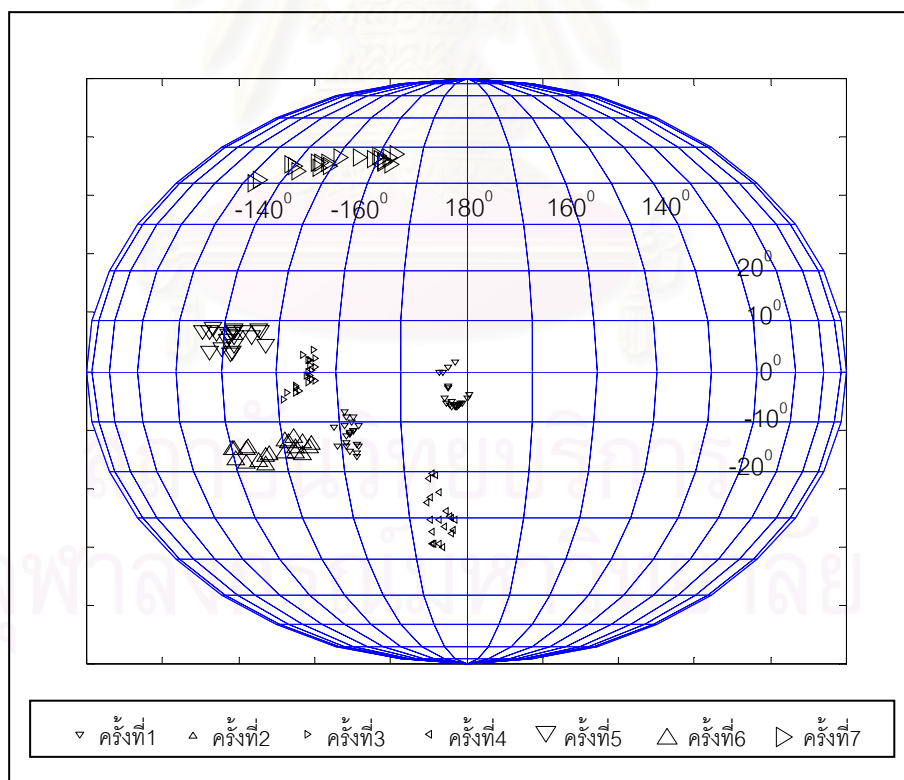


ข) ระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H

รูปที่ 5.10 ตำแหน่งของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของทานตะวัน



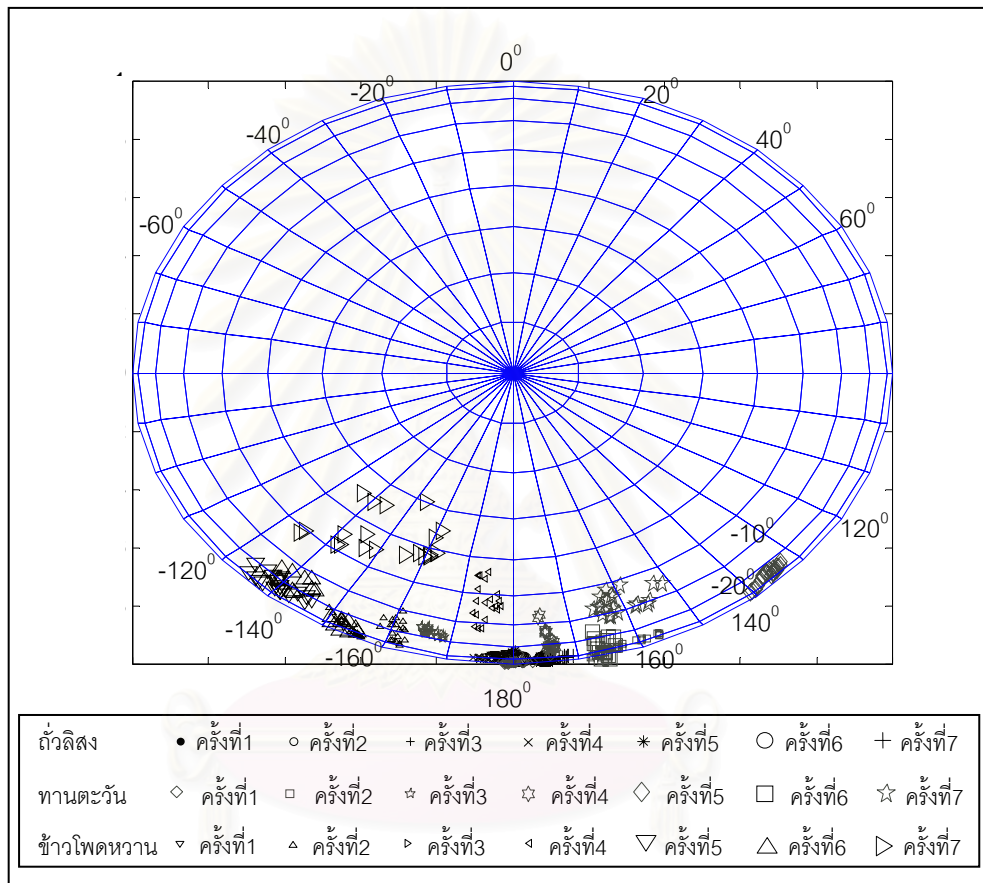
ก) ระนาบ YX เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H



ข) ระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H

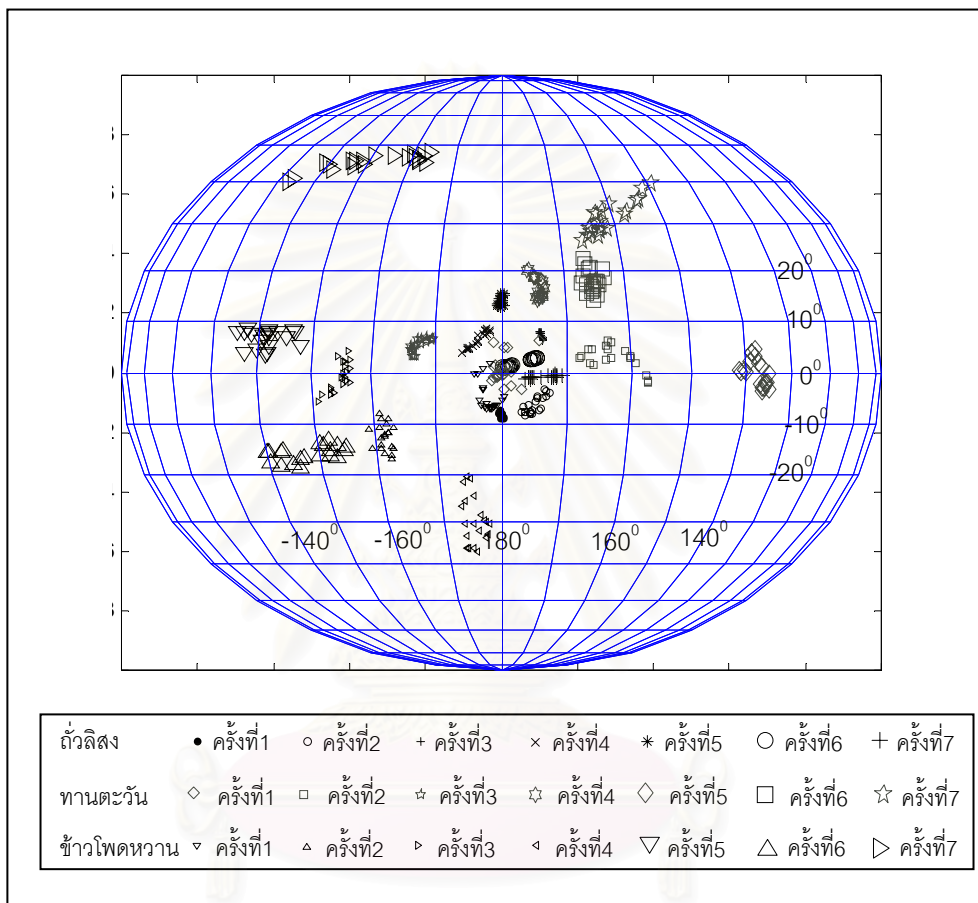
รูปที่ 5.11 ตำแหน่งของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของข้าวโพดหวาน





ก) ระนาบ YX เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H

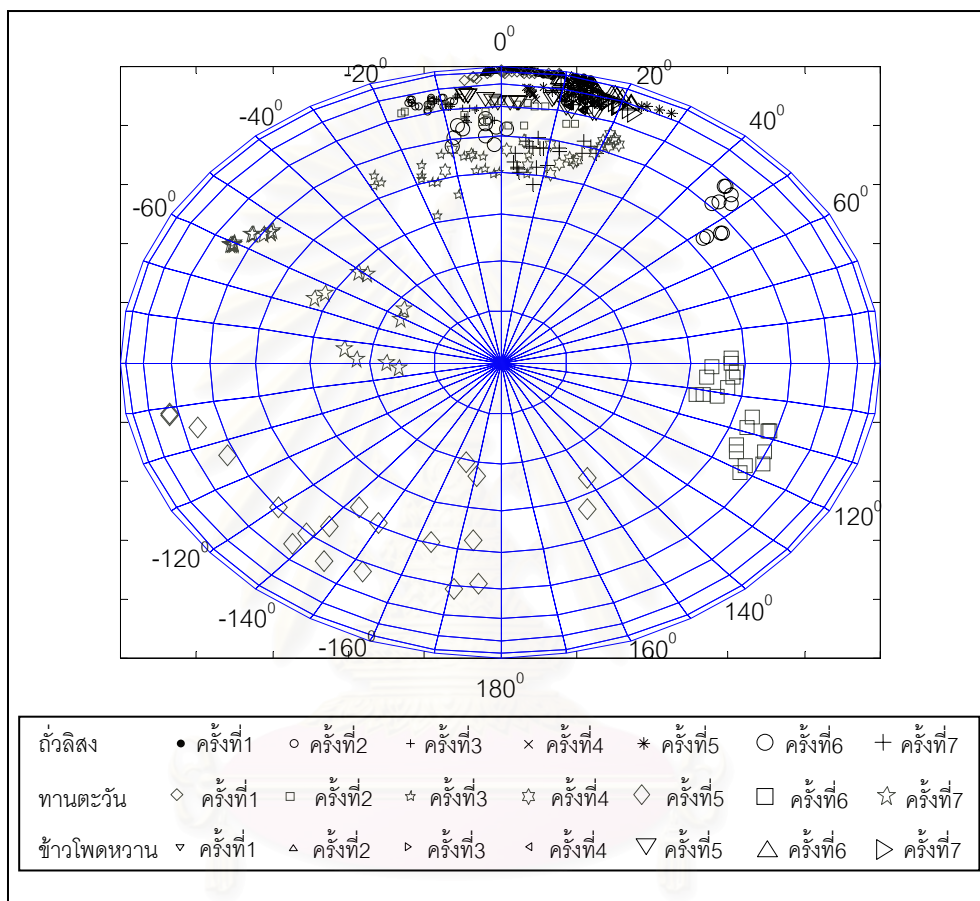
รูปที่ 5.12 ตำแหน่งของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของพีซีไร้ทั้ง 3 ชนิด



ข) ระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว H

รูปที่ 5.12 ตำแหน่งของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของพีซีไว้ทั้ง 3 ชนิด (ต่อ)

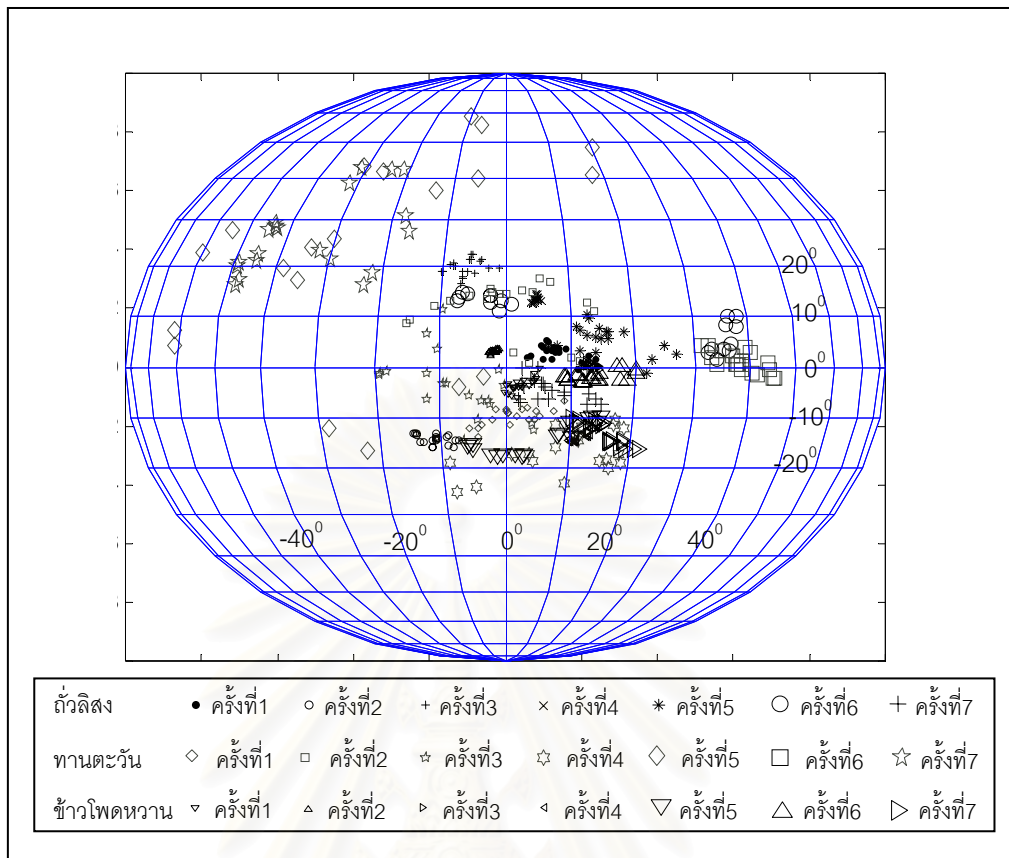
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว V

รูปที่ 5.13 ตำแหน่งของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของพีชไว้ทั้ง 3 ชนิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข) ระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นด้วยแนว V

รูปที่ 5.13 ตำแหน่งของสถานะโพลาไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเรของพีชไร่ทั้ง 3 ชนิด (ต่อ)

เมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว H สามารถแยกชนิดพีชไร่ออกจากกันได้โดยที่ถั่วลิสงเป็นพีชไร่ที่มีสถานะโพลาไรเซชันเกาะกลุ่มกันมากที่สุด มีลักษณะเป็นวงรีที่แกนโทมีขนาดเล็กไปจนถึงโพลาไรเซชันแบบเส้นตรง และมีความเอียงน้อยๆ ส่วนใหญ่อยู่ในแนว H เมื่อพิจารณาสถานะการเจริญเติบโตต่างๆ ของถั่วลิสง ตามรูปที่ 5.9ก และ 5.9ข พบว่าสามารถแยกข้อมูลจากการวัดออกจากกันได้ทั้ง 7 สถานะการเจริญเติบโต ขณะที่ทานตะวันมีการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่าถั่วลิสง และพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีลักษณะการหมุนวนทางซ้ายโดยที่ค่าความรีจะลดลงเมื่อทานตะวันมีอายุสูงขึ้น เมื่อพิจารณาสถานะการเจริญเติบโตต่างๆ ตามรูปที่ 5.10ก และ 5.10ข พบว่าข้อมูลจากการวัดทั้ง 7 ครั้งมีสถานะโพลาไรเซชันที่แตกต่างกัน และแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ส่วนข้าวโพดหวานมีการกระจายตัวของข้อมูลมากที่สุด และทั้งหมดมีค่ามุม  $\psi < 0$  แต่ก็สามารถแยกออกจากถั่วลิสงและทานตะวันได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาที่สถานะการเจริญเติบโตสถานะต่างๆ ของข้าวโพดหวาน ตามรูปที่ 5.11ก และ 5.11ข พบว่าข้อมูลจากการวัดทั้ง 7 ครั้งสามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับถั่วลิสงและทานตะวัน

จากรูปที่ 5.13ก ถึง 5.13ข พบว่าเมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว V จะไม่สามารถแยกพีชไร้ทั้ง 3 ชนิดออกจากกันได้เนื่องจากข้อมูลจากพีชไร้แต่ละชนิดทับซ้อนกัน และเมื่อพิจารณาการติดตามการเจริญเติบโตของพีชไร้แต่ละชนิด พบว่าไม่สามารถติดตามการเจริญเติบโตของพีชไร้ได้แม้จะพบว่าสามารถแยกข้อมูลออกเป็นกลุ่มๆ ได้พอสมควร แต่มีข้อมูลจากการวัดในครั้งที่ไม่มีอยู่ติดกันทับซ้อนกันจึงทำให้ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้

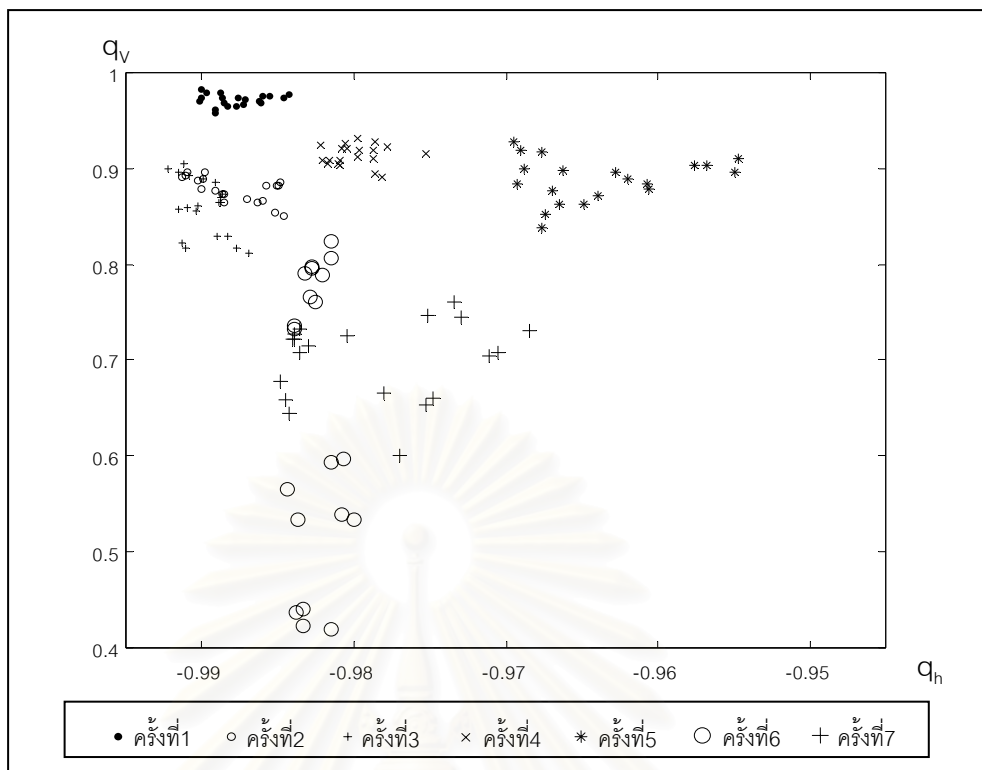
### อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาไรเซชัน

อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาไรเซชันเป็นองค์ประกอบหนึ่งของยูนิทสโตกส์พารามิเตอร์ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาไรเซชัน คือ ค่าอัตราส่วนความแตกต่างของความเข้มคลื่นกระเจิงในแนว V และ แนว H เทียบกับความเข้มของคลื่นกระเจิงทั้งหมดที่วัดได้ใช้สัญลักษณ์  $q$  จากสมการที่ (2.19) เมื่อจัดรูปใหม่โดยแทนค่าองค์ประกอบต่างๆ ด้วยสมการที่ (2.11) จะสามารถแสดงค่า  $q$  ได้ดังสมการที่ (5.2)

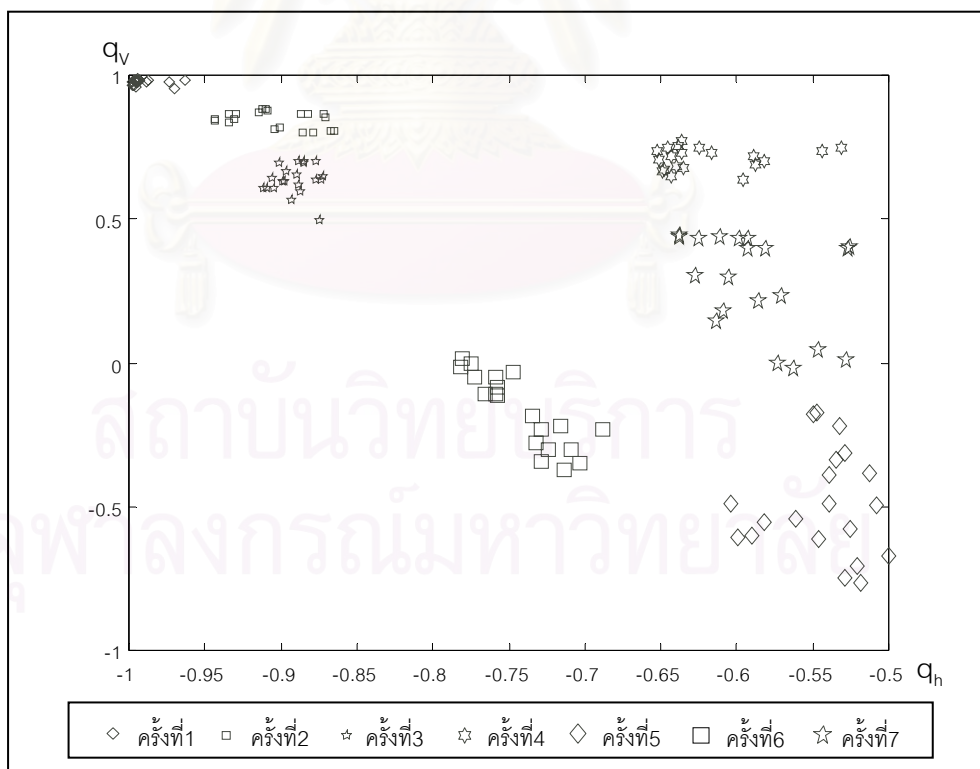
$$q = \frac{|E_v|^2 - |E_h|^2}{|E_v|^2 + |E_h|^2} \quad (5.3)$$

แต่เนื่องจากการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงมีการส่งคลื่นตกกระทบ 2 แนว คือ H และ V จึงทำให้สามารถหา  $q$  ได้ 2 ค่าตามแนวของคลื่นตกกระทบ คือ  $q_h$  และ  $q_v$  ซึ่งมาจากการส่งคลื่นตกกระทบในแนว H และ V ตามลำดับ ค่า  $q$  สามารถอธิบายสมบัติโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงได้อีกมุมมองหนึ่งซึ่งแตกต่างจากการพิจารณาด้วยวิธีอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อ  $q$  มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าความเข้มของคลื่นทั้ง 2 แนวมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อ  $q > 0$  แสดงว่าคลื่นมีความเข้มในแนว V มากกว่าแนว H และถ้า  $q = 1$  แสดงว่าคลื่นกระเจิงมีความเข้มในแนว V เท่านั้นในทางตรงกันข้ามถ้า  $q < 0$  แสดงว่าคลื่นกระเจิงมีความเข้มในแนว H มากกว่าแนว V และเมื่อ  $q = -1$  แสดงว่าคลื่นกระเจิงมีความเข้มในแนว H เท่านั้น

การติดตามการเจริญเติบโตของพีชไร้ด้วยวิธีพิจารณาอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาไรเซชันสามารถทำได้โดยการพิจารณา  $q_h$  และ  $q_v$  ร่วมกัน ซึ่งสามารถแสดงผลการพิจารณาของถั่วลิสงทานตะวัน ข้าวโพด และพีช 3 ชนิดพร้อมกันได้ดังรูปที่ 5.14 ถึง 5.17 ตามลำดับ

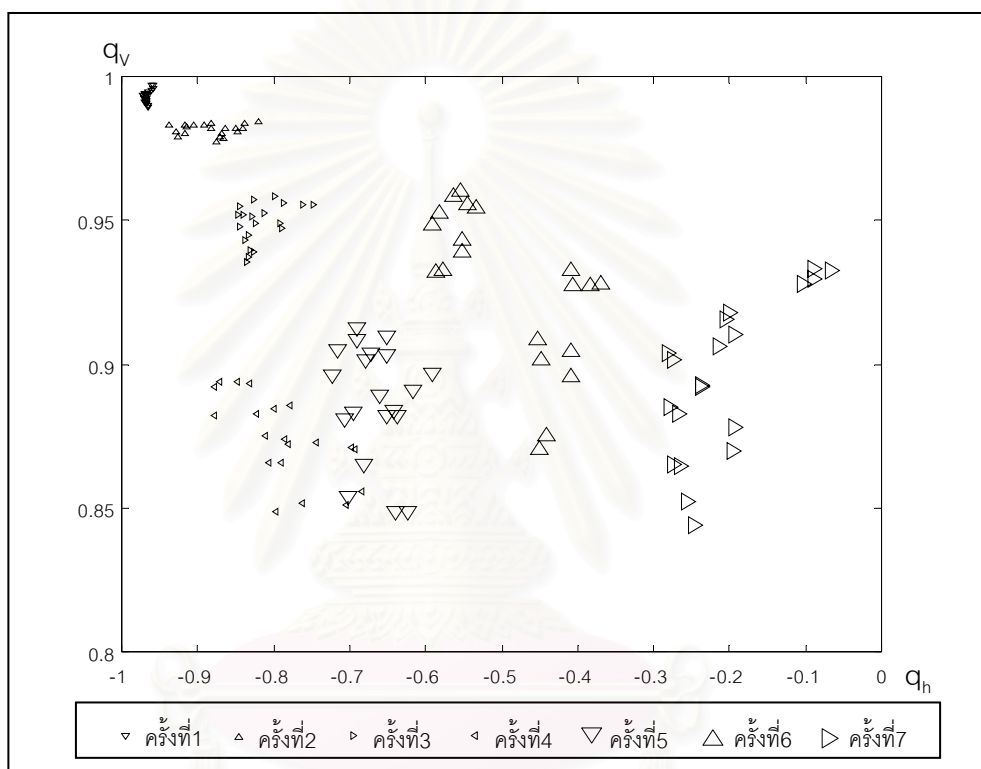


รูปที่ 5.14 อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันของถั่วลิสง



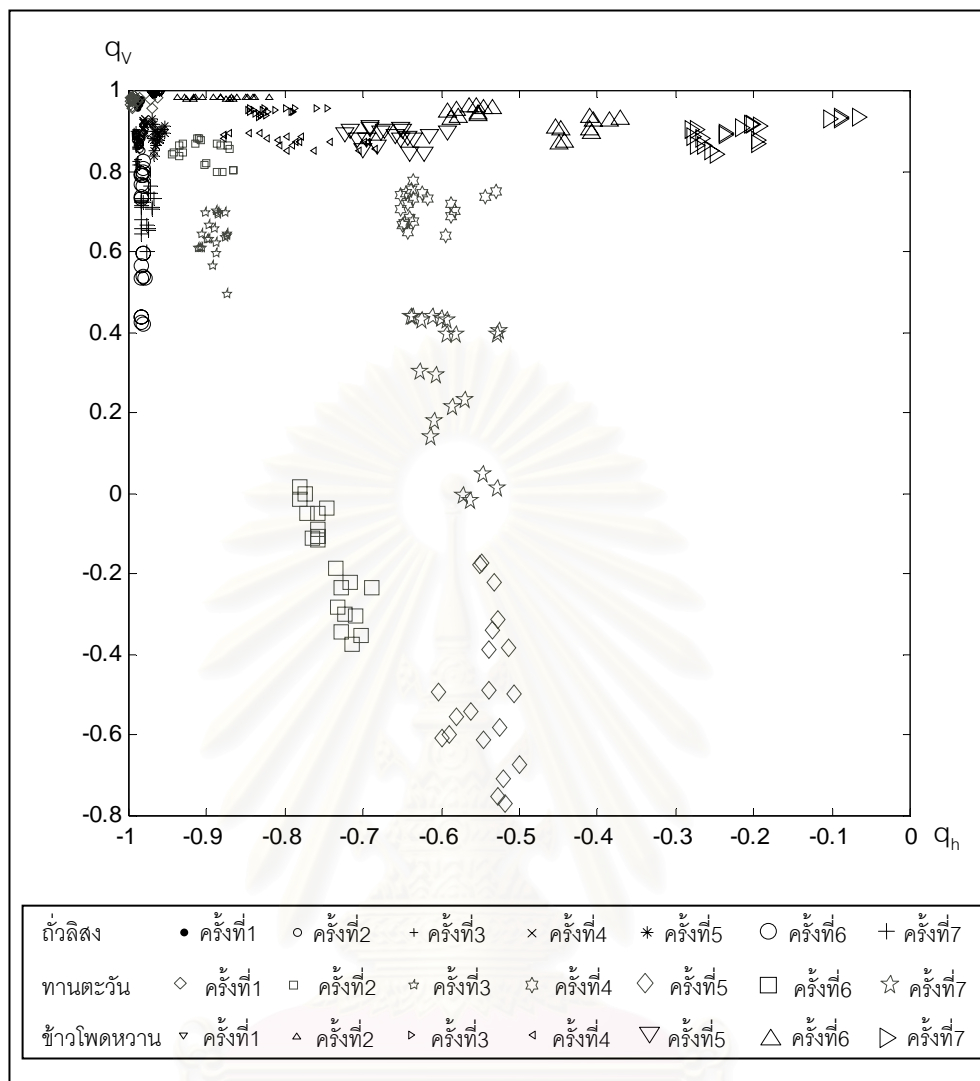
รูปที่ 5.15 อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันของทานตะวัน





รูปที่ 5.16 อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันของข้าวโพดหวาน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.17 อัตราส่วนการแบ่งแยกโกลาไรเซชันของพีซีไรทั้ง 3 ชนิด

จากรูปที่ 5.14 เมื่อพิจารณาถั่วลิสงที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ พบว่า เมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้นค่า  $q_h$  และ  $q_v$  มีการกระจายมากขึ้น เมื่อพิจารณาค่า  $q_h$  และ  $q_v$  ร่วมกันพบว่าสามารถแยกข้อมูลออกเป็นกลุ่มได้ 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1 กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2 3 4 และ 5 กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.15 พบว่าทานตะวันมีการกระจายของค่า  $q_h$  และ  $q_v$  มากกว่าถั่วลิสงและข้าวโพดหวาน และเมื่อทานตะวันมีอายุมากขึ้นจะมีการกระจายของ  $q_v$  มากขึ้น เมื่อพิจารณา  $q_h$  และ  $q_v$  ร่วมกันสามารถแยกข้อมูลออกจากกันได้ทั้ง 7 กลุ่มตามสถานะการเจริญเติบโตที่วัด

เก็บข้อมูล และเป็นพีชไรซ์ชนิดเดียวที่มี  $q_v < 0$  จากการวัดครั้งที่ 5 6 และ 7 แสดงว่าเมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว V จะมีพลังงานคลื่นกระเจิงกลับในแนว H มากกว่าแนว V ซึ่งแตกต่างจากกรณีอื่นๆ เพราะส่วนใหญ่ส่งคลื่นตกกระทบแนวใด พลังงานของคลื่นกระเจิงในแนวนั้นจะมีค่ามากกว่า

จากรูปที่ 5.16 พบว่าข้าวโพดหวานมีแนวโน้มการกระจายของค่า  $q_h$  และ  $q_v$  มากขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้น และค่า  $q_h$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้นเช่นกัน แต่  $q_v$  มีค่าสูงและมีการกระจายน้อยกว่าถั่วลิสงและทานตะวัน เมื่อพิจารณา  $q_h$  และ  $q_v$  ร่วมกันสามารถแยกข้อมูลออกเป็น 7 กลุ่มตามสถานะการเจริญเติบโตที่วัดเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 5.17 เมื่อพิจารณา  $q_h$  และ  $q_v$  ร่วมกันพบว่าสามารถแยกพีชไรซ์ทั้ง 3 ชนิดออกจากกันได้ตั้งแต่การวัดครั้งที่ 2 โดยถั่วลิสงมีค่า  $q_h$  ใกล้เคียงกันมากอยู่ในช่วง  $-1.00$  ถึง  $-0.95$  และมีค่า  $q_v$  อยู่ในช่วง  $0.4$  ถึง  $1$  เมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว H พลังงานของคลื่นกระเจิงกลับเกือบทั้งหมดจะอยู่ในแนว H ด้วยทุกสถานะการเจริญเติบโต แต่เมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว V พลังงานของคลื่นกระเจิงจะอยู่ในแนว V มากกว่าแนว H ทานตะวันมีการกระจายของ  $q_h$  และ  $q_v$  มากที่สุด แต่ก็สามารถแยกออกจากถั่วลิสงและข้าวโพดหวานได้ โดยค่า  $q_h$  อยู่ในช่วง  $-0.96$  ถึง  $-0.50$  และค่า  $q_v$  อยู่ในช่วง  $-0.80$  ถึง  $0.90$  แสดงว่าเมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว H คลื่นกระเจิงกลับยังมีพลังงานส่วนใหญ่อยู่ในแนว H แต่ก็มีอัตราส่วนพลังงานในแนว V มากกว่าถั่วลิสง เมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว V พลังงานของคลื่นกระเจิงในแนว H และแนว V มีค่าแตกต่างกันไปตามสถานะการเจริญเติบโต ข้าวโพดหวานมีค่า  $q_h$  และ  $q_v$  อยู่ในช่วง  $-0.95$  ถึง  $-0.05$  และ  $0.84$  ถึง  $0.99$  ตามลำดับ ค่า  $q_h$  มีการกระจายมากกว่าถั่วลิสงและทานตะวัน เมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว H คลื่นกระเจิงกลับในแนว H มีพลังงานมากกว่าแนว V แต่อัตราส่วนพลังงานในแนว V มีค่ามากกว่ากรณีถั่วลิสงและทานตะวัน เมื่อส่งคลื่นตกกระทบในแนว V พลังงานคลื่นกระเจิงกลับส่วนใหญ่อยู่ในแนว V และมีค่าใกล้เคียงกันทุกสถานะการเจริญเติบโต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่างๆ ที่คำนวณจากโพลาริเซนชันของคลื่น กระเจิง

การพิจารณาดัชนีต่างๆ ได้กล่าวมาแล้วนั้นมีความสามารถในการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ออกเป็นกลุ่มๆ ได้ต่างกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการเสนอดัชนีที่สามารถใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่แต่ละชนิดด้วยวิธีพิจารณาวิธีเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาว่าดัชนีนั้นมีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่แต่ละชนิดได้มากน้อยเพียงใด และสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้นั้นสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ถูกต้องเพียงใด สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ ที่แยกได้นั้นพิจารณาจากข้อมูลที่วัดได้จากพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ กันทั้ง 7 ครั้ง จึงสามารถแยกได้ไม่เกิน 7 สถานะ หากจำนวนสถานะที่แยกได้มีมากแสดงว่าวิธีพิจารณานั้นมีความสามารถในการแยกสถานะสูง แต่บางครั้งจะทำให้ความเชื่อถือได้ลดลงเพราะเกิดความผิดพลาดในการแยกสถานะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจำนวนสถานะที่แยกได้จึงต้องให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการพิจารณาเหตุผลทั้ง 2 ประการร่วมกัน

การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ออกเป็นกลุ่มๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้งเป็นเกณฑ์ในการแยกสถานะ หากข้อมูลในการวัดแต่ละครั้งส่วนใหญ่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มและสามารถแยกออกจากข้อมูลจากการวัดครั้งอื่นได้อย่างชัดเจนก็จะแยกเป็นสถานะการเจริญเติบโตหนึ่งสถานะ หากข้อมูลจากการวัดที่อยู่ติดกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลนั้นร่วมกันพบว่าสามารถแยกออกจากข้อมูลจากการวัดครั้งอื่นๆ ได้ จะรวมข้อมูลจากการวัดนั้นเป็นกลุ่มที่มีสถานะการเจริญเติบโตเดียวกัน แต่หากข้อมูลจากการวัดจากครั้งที่ห่างกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ก็แสดงว่าค่าดัชนีนั้นไม่สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ ในการพิจารณาข้อมูลโดยใช้ดัชนีที่ต่างกัน ค่าที่ได้จะมีการกระจายของข้อมูลต่างกันจึงทำให้มีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ไม่เท่ากัน การกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ออกจากกันเลือกใช้การกำหนดขอบเขตพื้นที่ของค่าดัชนีที่ใช้ในการพิจารณาในแต่ละวิธีเป็นกรอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยสร้างสี่เหลี่ยมผืนผ้าปกคลุมบริเวณที่มีข้อมูลของสถานะการเจริญเติบโตที่สนใจอยู่มากที่สุด และไม่ทับซ้อนกับกรอบของสถานะการเจริญเติบโตอื่นๆ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและให้ผลที่มีความถูกต้องมากกว่าการกำหนดกรอบพื้นที่แบบแจกแจงปกติซึ่งจะให้กรอบพื้นที่เป็นรูปวงรีรอบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่สนใจ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการแยกสถานะการเจริญเติบโตโดยพิจารณาจากดัชนีต่างๆ ทั้งสิ้น 4 ดัชนีได้แก่ 1. ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน 2. ระดับชั้นโพลารไรเซชัน 3. ตำแหน่งสถานะโพลารไรเซชันบนทรงกลมปวงกาเร และ 4. อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลารไรเซชัน โดยแต่ละดัชนีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

พิจารณาจากรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.4 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบเมทริกซ์การกระจาย 2 องค์ประกอบร่วมกันทั้ง 6 กรณี สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่แต่ละชนิดได้ต่างกัน แต่กรณีที่เหมาะสมที่สุดคือ การพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน เพราะนอกจากแยกการเจริญเติบโตของพืชไร่แต่ละชนิดได้แล้วยังสามารถแยกชนิดของพืชไร่ทั้ง 3 ได้อย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาพืชไร่แต่ละชนิดที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ กันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ดังนี้

1. ถั่วลิสงสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 4 สถานะดังนี้

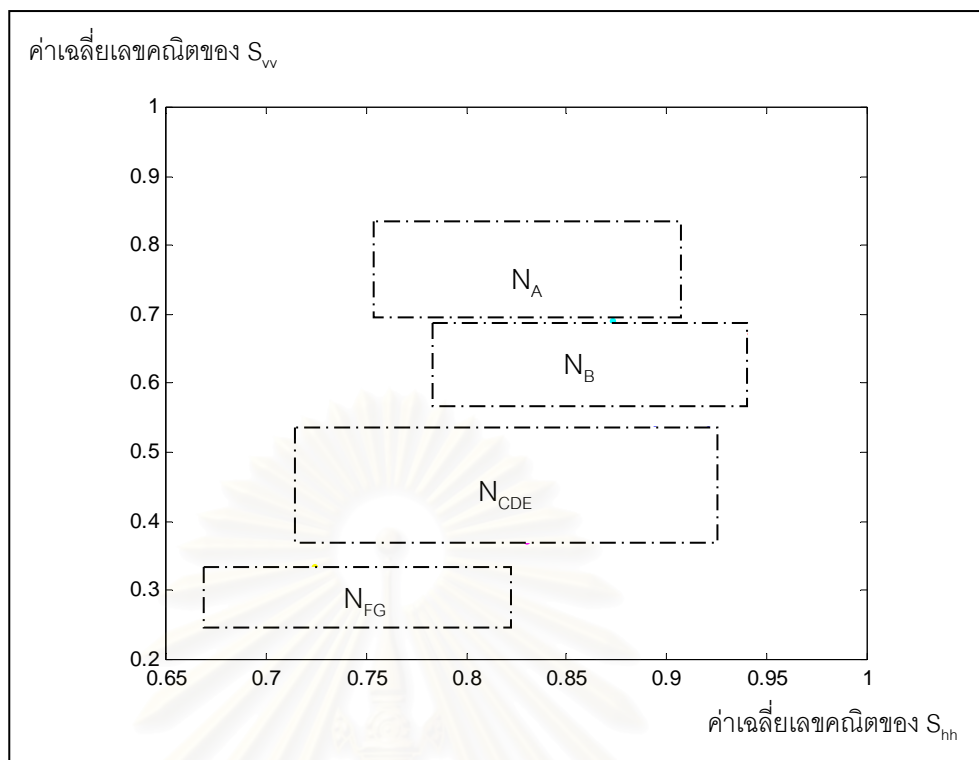
$N_A$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1

$N_B$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2

$N_{CDE}$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 3 4 และ 5

$N_{FG}$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6 และ 7

ผู้วิจัยสามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.18 และแสดงตารางการแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยวิธีนี้ในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.18 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง เมื่อพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

ตารางที่ 5.1 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงแยกด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน				
		$N_A$	$N_B$	$N_{CDE}$	$N_{FG}$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการวัดพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ถั่วลิสงครั้งที่ 1	18	1	0	0	1
	ถั่วลิสงครั้งที่ 2	2	18	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 3	0	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 4	0	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 5	0	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 6	0	0	0	20	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 7	0	0	0	20	0

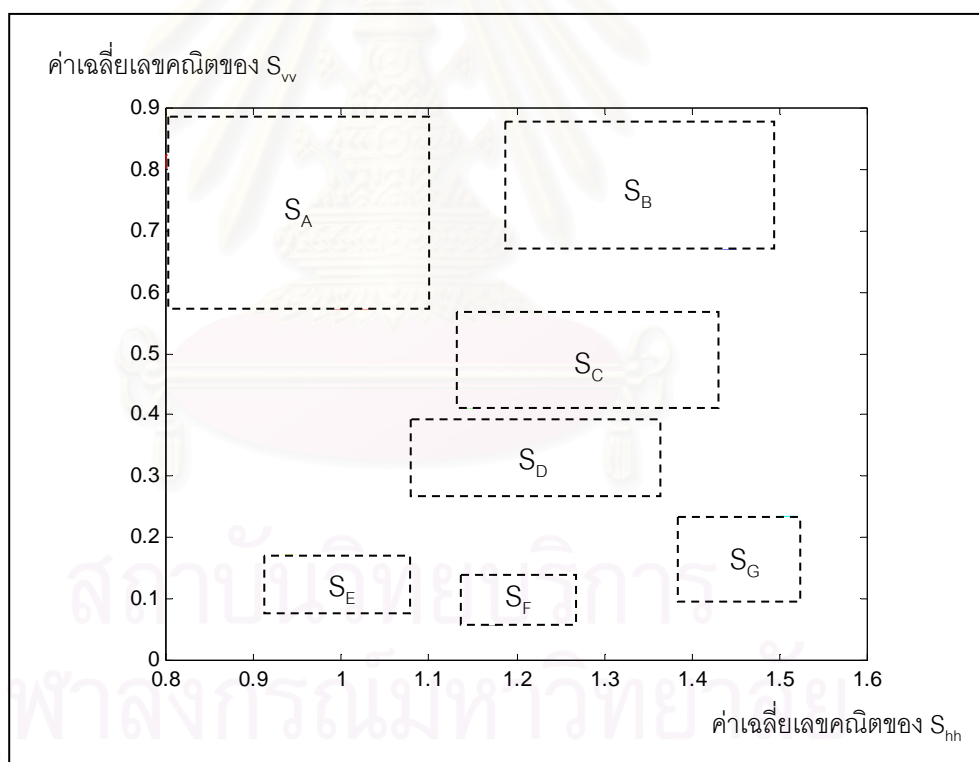
แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 136 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
 แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด 3 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
 ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม 1 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)



2. ทานตะวันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 7 สถานะดังนี้

- $S_A$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1
- $S_B$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2
- $S_C$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 3
- $S_D$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4
- $S_E$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 5
- $S_F$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6
- $S_G$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 7

สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.19 และตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.19 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวัน เมื่อพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

ตารางที่ 5.2 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต  
ขององค์ประกอบ  $S_{nh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

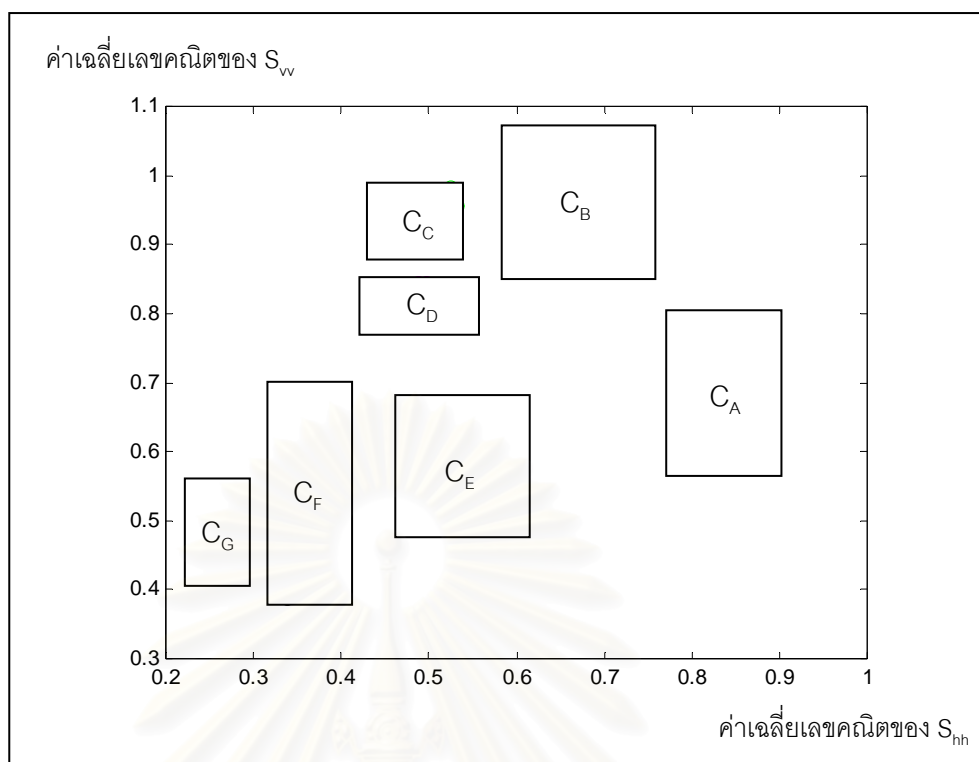
(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันแยกด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ $S_{nh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน							
		$S_A$	$S_B$	$S_C$	$S_D$	$S_E$	$S_F$	$S_G$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ทานตะวันครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 2	0	20	0	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 3	0	0	20	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 4	0	0	0	20	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 5	0	0	0	0	20	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 6	0	0	0	0	0	20	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 7	0	0	0	0	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด	140	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด	0	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม	0	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

3. ข้าวโพดหวานสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 7 สถานะดังนี้

- $C_A$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1
- $C_B$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2
- $C_C$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 3
- $C_D$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4
- $C_E$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 5
- $C_F$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6
- $C_G$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 7

สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.20 และ  
ตารางที่ 5.3



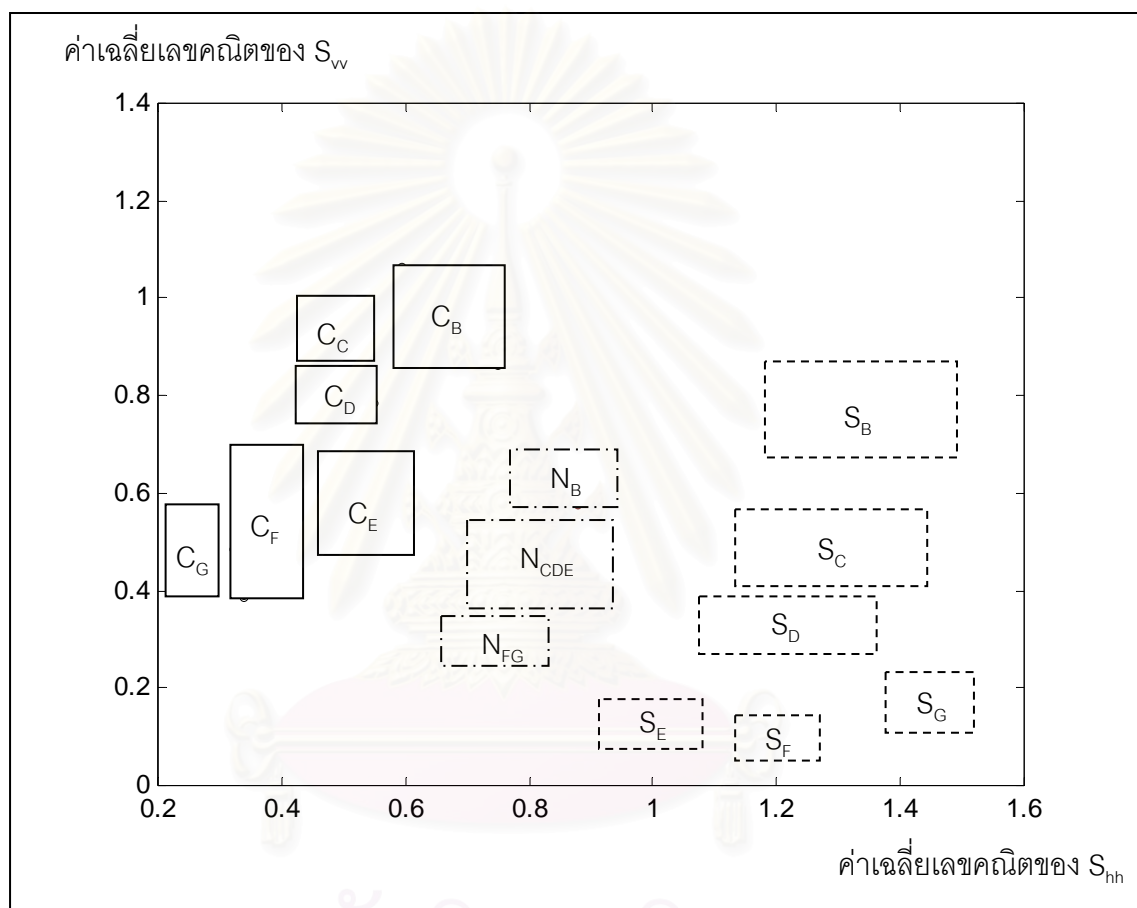
รูปที่ 5.20 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน เมื่อพิจารณาด้วย  
ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

ตารางที่ 5.3 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วย  
ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันที่แยกด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต ขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน							
		$C_A$	$C_B$	$C_C$	$C_D$	$C_E$	$C_F$	$C_G$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	0	20	0	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	0	0	20	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	0	0	0	20	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	0	0	0	0	20	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	0	0	0	0	0	20	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	0	0	0	0	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 140 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันพบว่า การพิจารณาด้วยวิธีนี้สามารถแยกชนิดและสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ตั้งแต่การวัดครั้งที่ 2 จนครบวงจรชีวิตที่การวัดครั้งที่ 7 โดยสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้ให้ผลเช่นเดียวกับการพิจารณาพืชไร่ทีละชนิด ส่วนข้อมูลของพืชไร่แต่ละชนิดจากการวัดครั้งที่ 1 เมื่อนำมาพิจารณาได้ค่าที่ใกล้เคียงกันและไม่สามารถแยกออกจากกันได้จึงไม่สามารถระบุสถานะ  $N_A$ ,  $S_A$  และ  $C_A$  ได้ แต่สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดได้ดังแสดงในรูปที่ 5.21 และตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.21 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน

ตารางที่ 5.4 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดด้วย

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน

การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ $S_{hh}$ และ $S_{vv}$ ร่วมกัน					
ข้อมูลจากการวัดที่ สถานะการเจริญต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ได้ถูกต้อง	จำนวน ที่แยกผิด สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ผิดชนิด	ไม่สามารถ ระบุ สถานะการ เจริญเติบโต ได้
ถั่วลิสงครั้งที่ 1	-	0	1	0	19
ถั่วลิสงครั้งที่ 2	$N_B$	18	0	0	2
ถั่วลิสงครั้งที่ 3	$N_{CDE}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 4	$N_{CDE}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 5	$N_{CDE}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 6	$N_{FG}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 7	$N_{FG}$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 1	-	0	0	1	19
ทานตะวันครั้งที่ 2	$S_B$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 3	$S_C$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 4	$S_D$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 5	$S_E$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 6	$S_F$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 7	$S_G$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	-	0	0	8	12
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	$C_B$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	$C_C$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	$C_D$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	$C_E$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	$C_F$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	$C_G$	20	0	0	0

จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน 15 สถานะ

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 358 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดแต่ยังเป็นพืชไร่ชนิดเดียวกัน 1 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

แยกชนิดของพืชไร่ผิดรวมทั้งหมด 9 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวมทั้งหมด 52 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)  
การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

จากรูป 5.5 ถึง 5.7 พบว่าหากพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดด้วยการพิจารณาระดับชั้นโพลาริเซชัน ถั่วลิสง ทานตะวันและข้าวโพดหวาน สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้เป็น 3 6 และ 5 สถานะ ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่แต่ละชนิดดังนี้

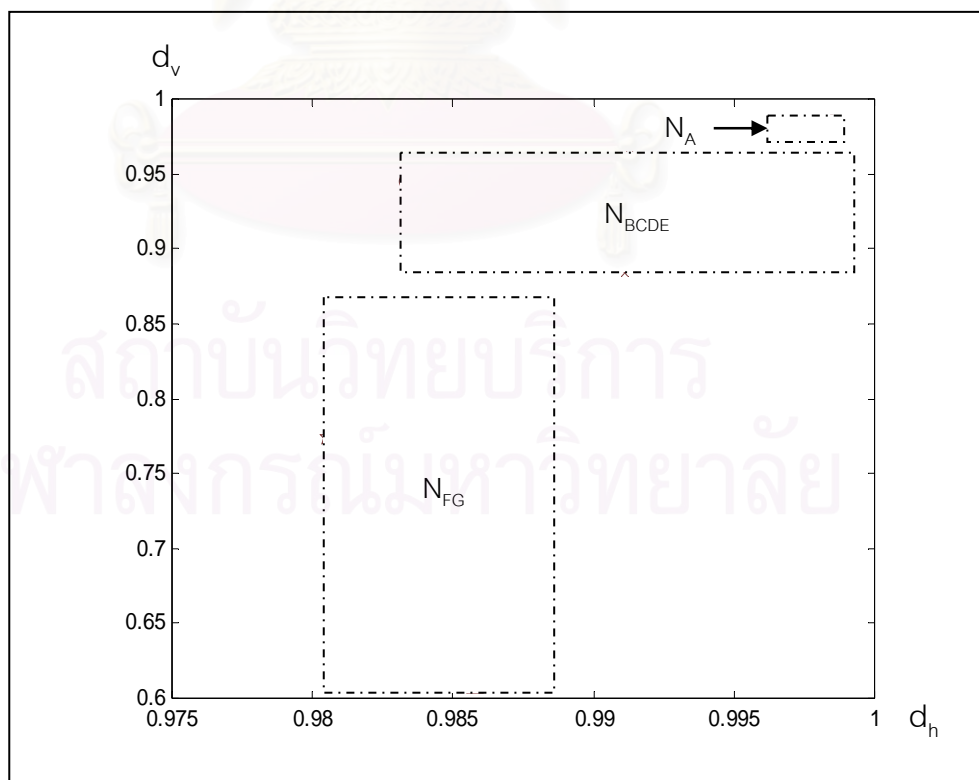
1. ถั่วลิสง สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้เป็น 3 สถานะดังนี้

$N_A$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1

$N_{BCDE}$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2 3 4 และ 5

$N_{FG}$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6 และ 7

สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.22 และตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.22 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง



## เมื่อพิจารณาด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

ตารางที่ 5.5 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

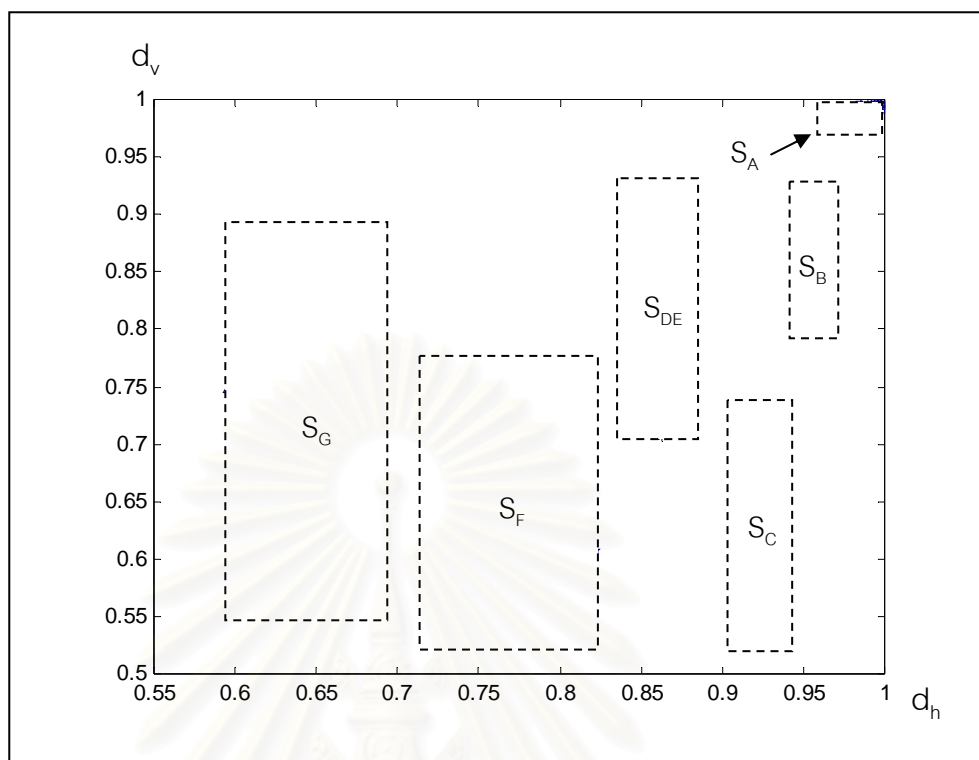
(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงที่แยกด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน			
		$N_A$	$N_{BCDE}$	$N_{FG}$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ถั่วลิสงครั้งที่ 1	20	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 2	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 3	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 4	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 5	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 6	0	0	20	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 7	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด	140	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด	0	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม	0	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

2. ทานตะวันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 6 สถานะดังนี้

- $S_A$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1
- $S_B$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2
- $S_C$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 3
- $S_{DE}$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4 และ 5
- $S_F$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6
- $S_G$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 7

สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และ ตารางที่ 5.6



รูปที่ 5.23 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวัน  
เมื่อพิจารณาด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

ตารางที่ 5.6 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

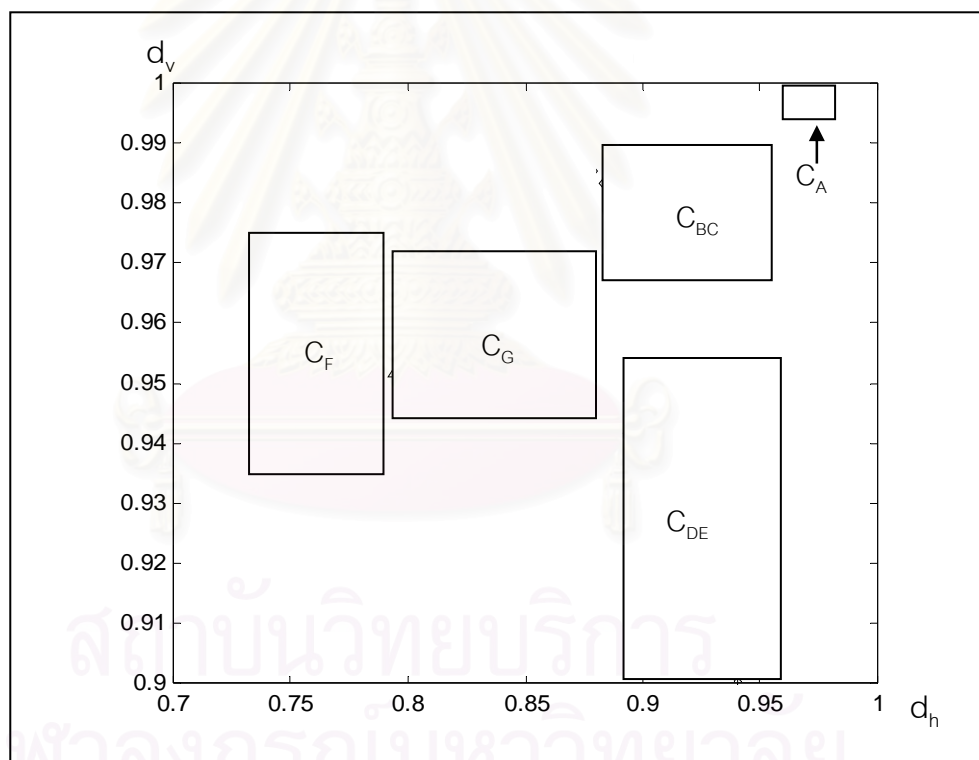
(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันที่แยกด้วย ระดับชั้นโพลาริเซชัน						
		$S_A$	$S_B$	$S_C$	$S_{DE}$	$S_F$	$S_G$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ทานตะวันครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 2	0	20	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 3	0	0	20	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 4	0	0	0	20	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 5	0	0	0	20	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 6	0	0	0	0	20	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 7	0	0	0	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 140 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

3. ข้าวโพดหวานสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 5 สถานะดังนี้

- $C_A$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1
- $C_{BC}$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2 และ 3
- $C_{DE}$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4 และ 5
- $C_F$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6
- $C_G$  คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 7

สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.24 และตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.24 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน

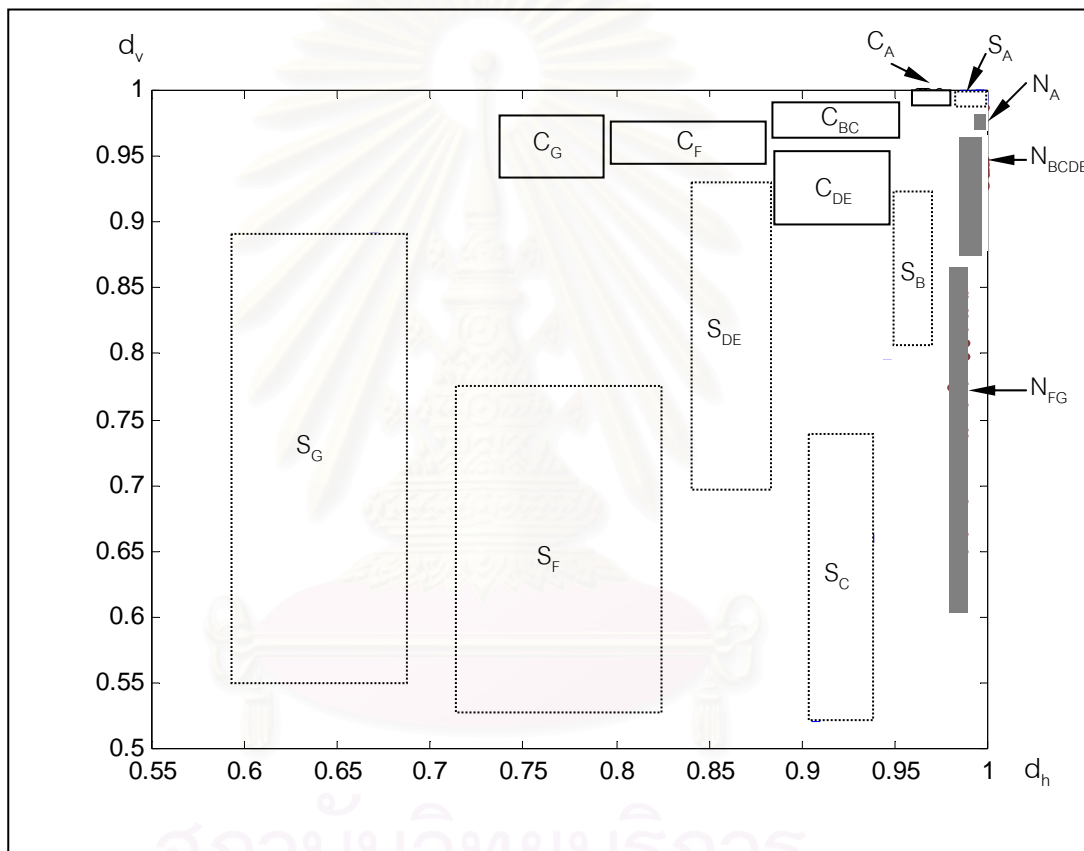
เมื่อพิจารณาด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

ตารางที่ 5.7 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานที่แยกด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน					
		C <sub>A</sub>	C <sub>BC</sub>	C <sub>DE</sub>	C <sub>F</sub>	C <sub>G</sub>	อื่นๆ
ข้อมูลจากการวัดพืชไร่ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	0	18	0	0	0	2
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	0	20	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	0	0	20	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	0	0	20	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	0	0	0	18	2	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	0	0	0	2	17	1

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 133 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
 แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด 4 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
 ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม 3 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน พบว่าสามารถแยกชนิดและสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ออกจากกันได้ตั้งแต่สถานะการเจริญเติบโตของข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1 โดยสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้เหมือนการพิจารณาพืชไร่ทีละชนิด แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงขอบเขตสถานะการเจริญเติบโตเมื่อพิจารณาพืชไร่แต่ละชนิดที่บางสถานะการเจริญเติบโต เพราะเมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันพบว่าขอบเขตเดิมมีการทับซ้อนกันที่บางสถานะ และสามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.25 ตารางที่ 5.8



รูปที่ 5.25 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของพีชไร้ทั้ง 3 ชนิด  
เมื่อพิจารณาด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

ตารางที่ 5.8 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน

การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน					
ข้อมูลจากการวัดที่ สถานะการเจริญต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ได้ถูกต้อง	จำนวน ที่แยกผิด สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ผิดชนิด	ไม่สามารถ ระบุ สถานะการ เจริญเติบโต ได้
ถั่วลิสงครั้งที่ 1	$N_A$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 2	$N_{BCDE}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 3	$N_{BCDE}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 4	$N_{BCDE}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 5	$N_{BCDE}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 6	$N_{FG}$	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 7	$N_{FG}$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 1	$S_A$	16	0	3	1
ทานตะวันครั้งที่ 2	$S_B$	16	0	0	4
ทานตะวันครั้งที่ 3	$S_C$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 4	$S_{DE}$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 5	$S_{DE}$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 6	$S_F$	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 7	$S_G$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	$C_A$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	$C_{BC}$	18	2	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	$C_{BC}$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	$C_{DE}$	15	0	0	5
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	$C_{DE}$	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	$C_F$	18	2	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	$C_G$	17	2	0	1

จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน 14 สถานะ  
แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 400 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)  
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดแต่ยังเป็นพืชไร่ชนิดเดียวกัน 6 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)  
แยกชนิดของพืชไร่ผิดรวมทั้งหมด 3 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)



ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวมทั้งหมด 11 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)  
การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของ  
ทรงกลมปวงกาเร

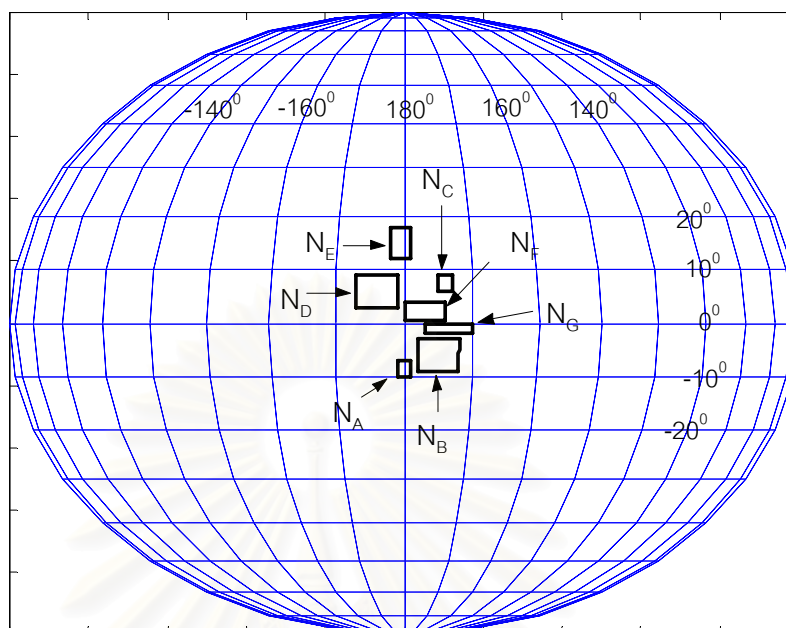
จากรูป 5.9 ถึง 5.12 พบว่า กลุ่มข้อมูลของพืชไร่ทั้งหมดสามารถแยกความแตกต่างได้  
 ด้วยการพิจารณาตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร เมื่อส่งคลื่น  
 ตกกระทบด้วยแนวโพลาริเซชัน H จึงทำให้สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยวิธีนี้  
 การกำหนดขอบเขตพื้นที่เพื่อแยกสถานะทำได้โดยสร้างกรอบรูปสี่เหลี่ยมบนผิวทรงกลมปวงกาเร  
 โดยเส้นแนวนอนและแนวตั้งถูกกำหนดด้วยเส้นละติจูดและลองจิจูดของทรงกลมตามลำดับ

เมื่อพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดจะสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้เป็น 7 สถานะ โดย  
 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ถั่วลิสงสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 7 สถานะดังนี้

- |       |   |
|-------|---|
| $N_A$ | คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 1 |
| $N_B$ | คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 2 |
| $N_C$ | คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 3 |
| $N_D$ | คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 4 |
| $N_E$ | คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 5 |
| $N_F$ | คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 6 |
| $N_G$ | คือ สถานะการเจริญเติบโตที่ประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดครั้งที่ 7 |

สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.26 และ  
 ตารางที่ 5.9



รูปที่ 5.26 ขอบเขตของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงเมื่อพิจารณาด้วย  
ตำแหน่งสถานะโพลาร์ไรเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร

ตารางที่ 5.9 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วยตำแหน่งสถานะ  
โพลาร์ไรเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงที่แยกด้วยตำแหน่งสถานะ โพลาร์ไรเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร							
		$N_A$	$N_B$	$N_C$	$N_D$	$N_E$	$N_F$	$N_G$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ถั่วลิสงครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 2	0	20	0	0	0	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 3	0	0	20	0	0	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 4	0	0	0	20	0	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 5	0	0	0	0	20	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 6	0	0	0	0	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 7	0	0	0	0	0	0	20	0

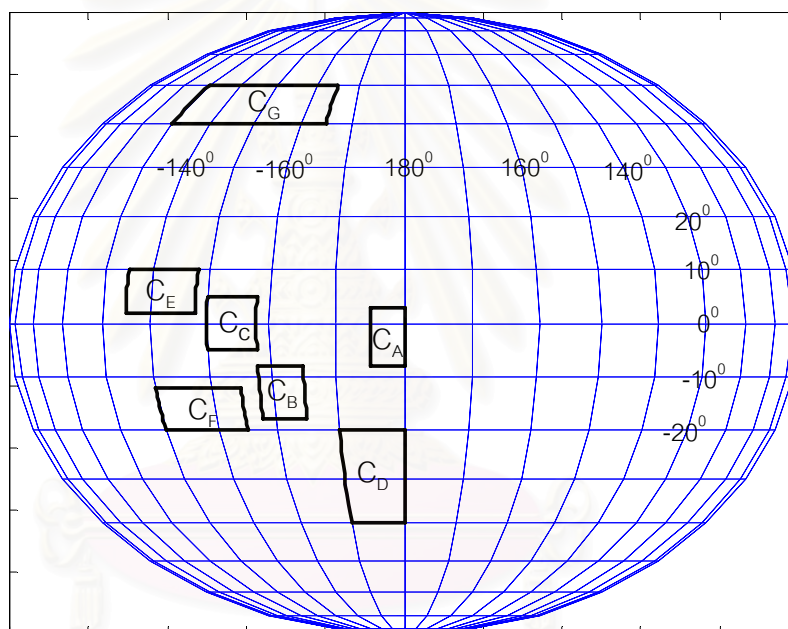
แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 140 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)



แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด	140	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด	0	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม	0	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

3. ข้าวโพดหวานสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 7 สถานะเหมือนการแยกด้วยวิธีพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_w$  ร่วมกัน สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.28 และแสดงตารางการแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วยวิธีนี้ในตารางที่ 5.11



รูปที่ 5.28 ขอบเขตของสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานเมื่อพิจารณาด้วยตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

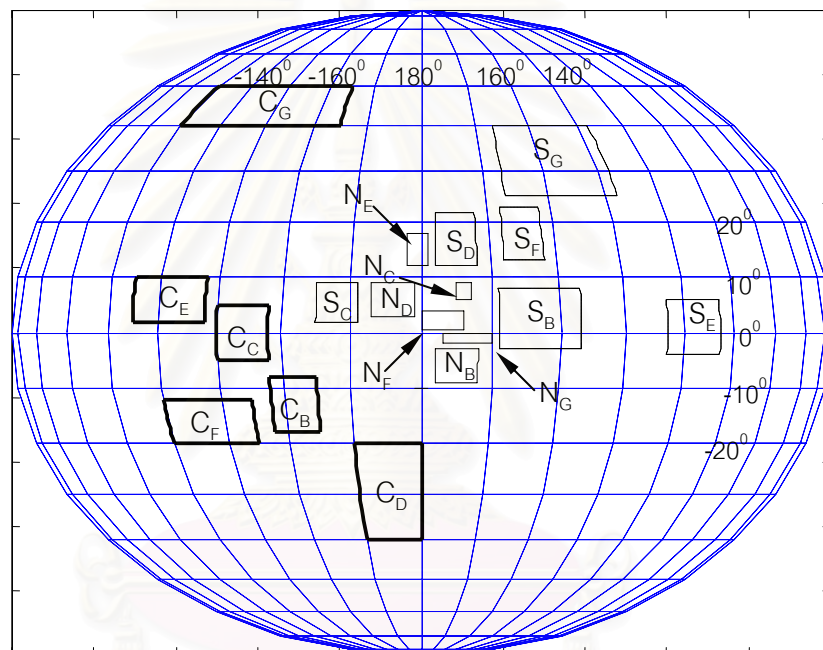
ตารางที่ 5.11 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานด้วยตำแหน่ง  
สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานที่แยกด้วยตำแหน่ง สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร							
		$C_A$	$C_B$	$C_C$	$C_D$	$C_E$	$C_F$	$C_G$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	0	20	0	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	0	0	20	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	0	0	0	20	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	0	0	0	0	20	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	0	0	0	0	0	20	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	0	0	0	0	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 140 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน พบว่าสามารถแยกชนิดและสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ออกจากกันได้ตั้งแต่สถานะการเจริญเติบโตของการวัดครั้งที่ 2 โดยสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้เหมือนการพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดแต่ไม่สามารถระบุสถานะ  $N_A$ ,  $S_A$  และ  $C_A$  ได้ เท่านั้น โดยสามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.29 และตารางที่ 5.12

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.29 ขอบเขตของสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดเมื่อพิจารณาด้วย  
ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 5.12 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดด้วยตำแหน่ง

สถานะโพลาริเซชันบนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร

การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยตำแหน่งสถานะโพลาริเซชัน					
บนระนาบ YZ ของทรงกลมปวงกาเร					
ข้อมูลจากการวัดที่ สถานะการเจริญต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ได้ถูกต้อง	จำนวน ที่แยกผิด สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ผิดชนิด	ไม่สามารถ ระบุ สถานะการ เจริญเติบโต ได้
ถั่วลิสงครั้งที่ 1	-	0	0	0	20
ถั่วลิสงครั้งที่ 2	N <sub>B</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 3	N <sub>C</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 4	N <sub>D</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 5	N <sub>E</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 6	N <sub>F</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 7	N <sub>G</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 1	-	0	0	12	8
ทานตะวันครั้งที่ 2	S <sub>B</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 3	S <sub>C</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 4	S <sub>D</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 5	S <sub>E</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 6	S <sub>F</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 7	S <sub>G</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	-	0	0	2	18
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	C <sub>B</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	C <sub>C</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	C <sub>E</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	C <sub>E</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	C <sub>F</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	C <sub>G</sub>	20	0	0	0

จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน 18 สถานะ

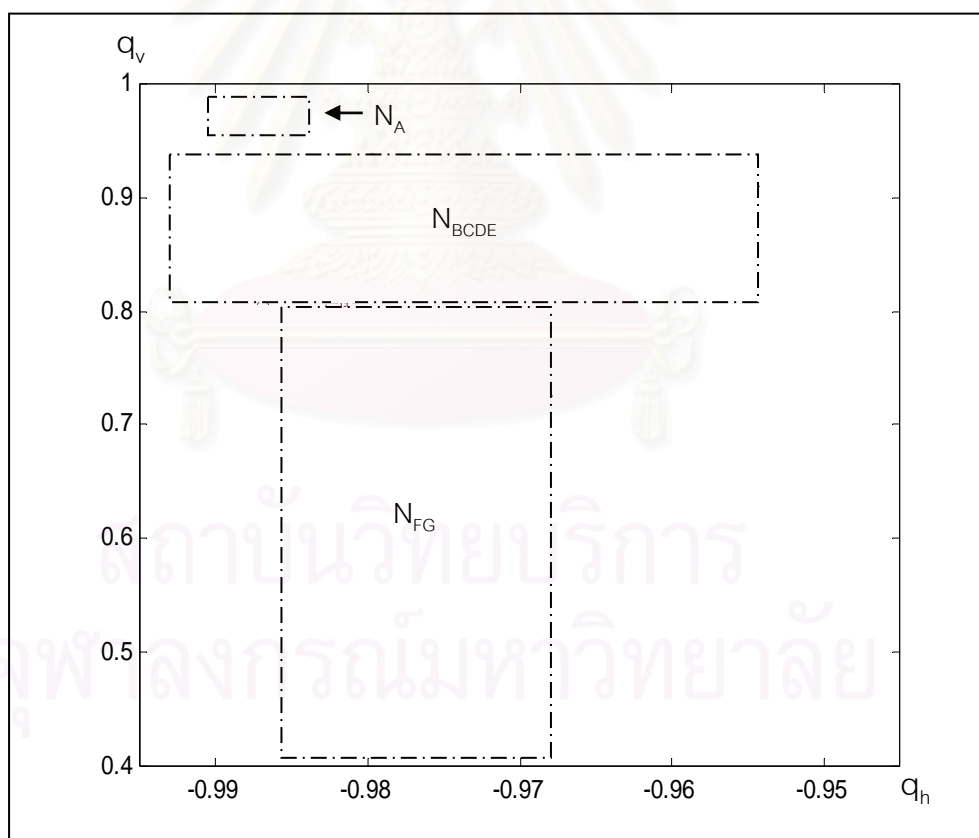
แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 360 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดแต่ยังเป็นพืชไร่ชนิดเดียวกัน 0 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

แยกชนิดของพีชไรต์โดยรวมทั้งหมด	14 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตโดยรวมทั้งหมด	46 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)
<u>การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไรต์ด้วยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน</u>	

จากรูปที่ 5.13 ถึง 5.17 พบว่าสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไรต์ด้วยการพิจารณาค่า  $q_h$  และ  $q_v$  ร่วมกันได้ โดยเมื่อพิจารณาพีชไรต์ที่ลักษณะชนิดสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวานได้เป็น 3 7 และ 7 สถานะ ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ถั่วลิสงสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 3 สถานะเหมือนการแยกด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.30 และตารางที่ 5.13



รูปที่ 5.30 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง เมื่อพิจารณาด้วยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน

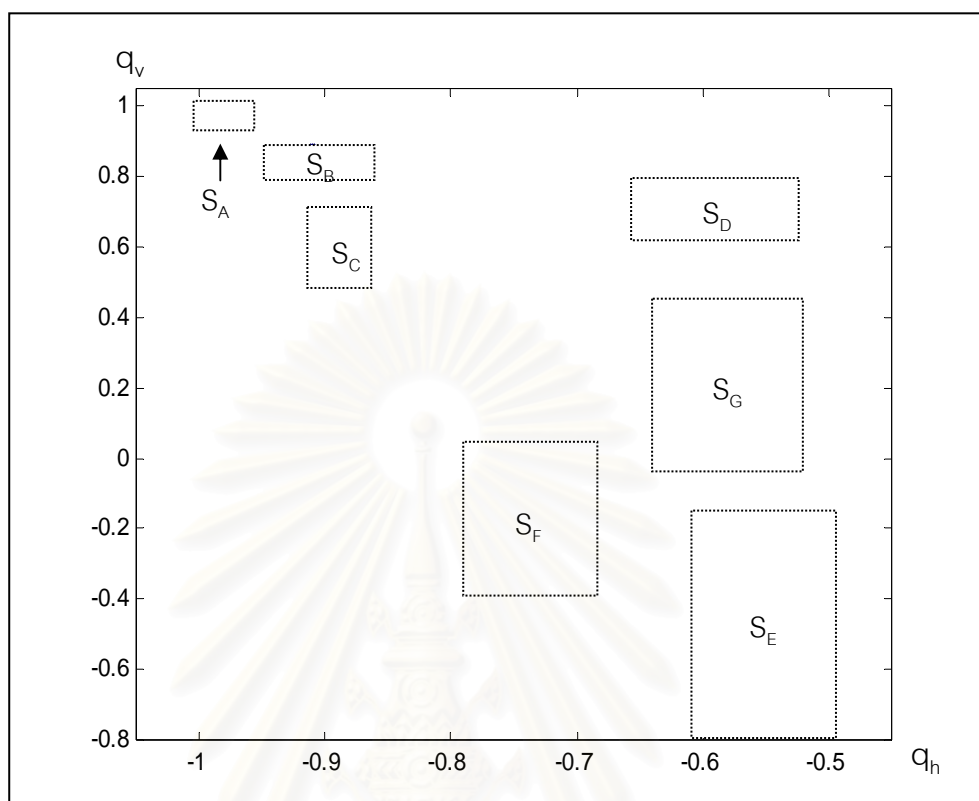
ตารางที่ 5.13 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงด้วย  
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลีไรเซชัน

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสงที่แยกด้วย อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลีไรเซชัน			
		$N_A$	$N_{BCDE}$	$N_{FG}$	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ถั่วลิสงครั้งที่ 1	20	0	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 2	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 3	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 4	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 5	0	20	0	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 6	0	0	20	0
	ถั่วลิสงครั้งที่ 7	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 140 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดพลาดทั้งหมด 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

2. ทานตะวันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 7 สถานะเหมือนการแยกด้วยวิธีพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{nh}$  และ  $S_v$  ร่วมกัน สามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.31 และตารางที่ 5.14

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.31 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวัน เมื่อพิจารณาด้วย  
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน

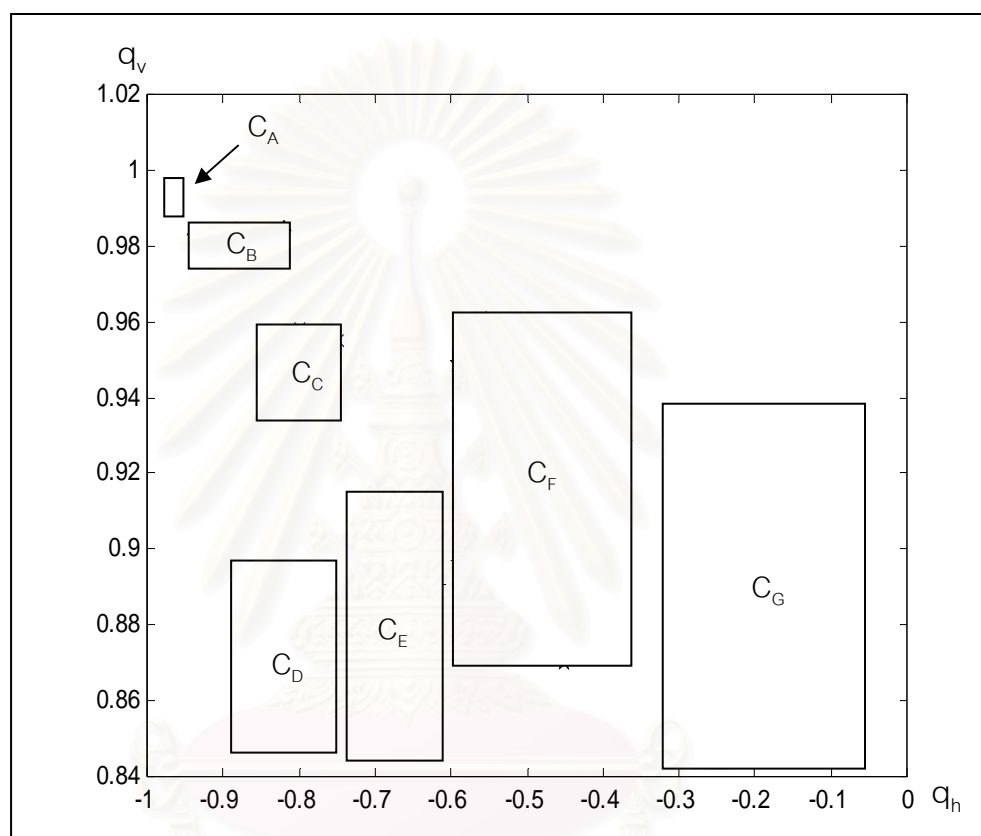
ตารางที่ 5.14 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันด้วย  
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของทานตะวันที่แยกด้วย อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน							
		S <sub>A</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>C</sub>	S <sub>D</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>F</sub>	S <sub>G</sub>	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ทานตะวันครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 2	0	20	0	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 3	0	0	20	0	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 4	0	0	0	20	0	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 5	0	0	0	0	20	0	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 6	0	0	0	0	0	20	0	0
	ทานตะวันครั้งที่ 7	0	0	0	0	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 140 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)  
 ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม 0 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

3. ชาวโพดหวานสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ออกเป็น 7 สถานะเหมือนการแยกด้วยวิธีพิจารณาด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน และสามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโต ดังแสดงในรูปที่ 5.32 และตารางที่ 5.15



รูปที่ 5.32 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของชาวโพดหวาน เมื่อพิจารณาด้วยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลีไรเซน

สถาบันวิจัยพืชไร่  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

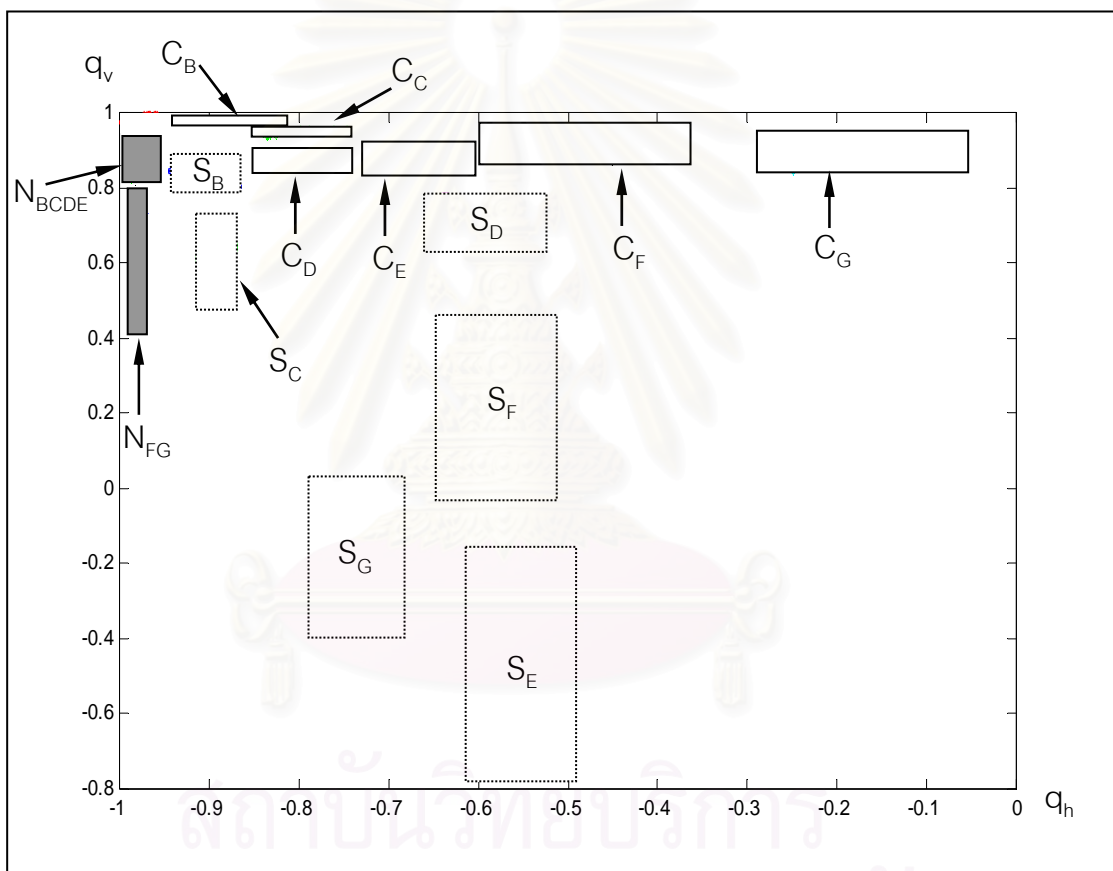
ตารางที่ 5.15 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน  
ด้วยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน

(ตำแหน่ง)		สถานะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานที่แยกด้วย อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน							
		C <sub>A</sub>	C <sub>B</sub>	C <sub>C</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>E</sub>	C <sub>F</sub>	C <sub>G</sub>	อื่นๆ
ข้อมูลจากการ วัดพืชไร่ที่ สถานะการ เจริญเติบโต ต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	20	0	0	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	0	20	0	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	0	0	20	0	0	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	0	0	0	15	4	0	0	1
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	0	0	0	0	20	0	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	0	0	0	0	0	20	0	0
	ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	0	0	0	0	0	0	20	0

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด	135	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดรวมทั้งหมด	4	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)
ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวม	1	ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 140 ตำแหน่ง)

เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน พบว่าสามารถแยกชนิดและสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ออกจากกันได้ตั้งแต่สถานะการเจริญเติบโตของการวัดครั้งที่ 2 โดยสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้เหมือนการพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดแต่ไม่สามารถระบุสถานะ  $N_A$ ,  $S_A$  และ  $C_A$  ได้ เท่านั้น และต้องมีการเปลี่ยนแปลงขอบเขตสถานะการเจริญเติบโตเมื่อพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดที่บางสถานะการเจริญเติบโต เพราะเมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันพบว่าขอบเขตเดิมมีการทับซ้อนกันที่บางสถานะ โดยสามารถกำหนดขอบเขตเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของ พืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.33 และตารางที่ 5.16





รูปที่ 5.33 ขอบเขตพื้นที่ของสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาด้วย อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน

## ตารางที่ 5.16 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด

## ด้วยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน

การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน					
ข้อมูลจากการวัดที่ สถานะการเจริญต่างๆ (ครั้งละ 20 ตำแหน่ง)	สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ได้ถูกต้อง	จำนวน ที่แยกผิด สถานะการ เจริญเติบโต	จำนวน ข้อมูลที่แยก ผิดชนิด	ไม่สามารถ ระบุสถานะ การเจริญ เติบโตได้
ถั่วลิสงครั้งที่ 1	-	0	0	0	20
ถั่วลิสงครั้งที่ 2	N <sub>BCDE</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 3	N <sub>BCDE</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 4	N <sub>BCDE</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 5	N <sub>BCDE</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 6	N <sub>FG</sub>	20	0	0	0
ถั่วลิสงครั้งที่ 7	N <sub>FG</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 1	-	0	0	2	18
ทานตะวันครั้งที่ 2	S <sub>B</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 3	S <sub>C</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 4	S <sub>D</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 5	S <sub>E</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 6	S <sub>F</sub>	20	0	0	0
ทานตะวันครั้งที่ 7	S <sub>G</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 1	-	0	0	2	18
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 2	C <sub>B</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 3	C <sub>C</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 4	C <sub>E</sub>	12	4	2	2
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 5	C <sub>E</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 6	C <sub>F</sub>	20	0	0	0
ข้าวโพดหวานครั้งที่ 7	C <sub>G</sub>	20	0	0	0

จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน 14 สถานะ

แยกสถานะการเจริญเติบโตได้ถูกต้องรวมทั้งหมด 352 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

แยกสถานะการเจริญเติบโตผิดแต่ยังเป็นพืชไร่ชนิดเดียวกัน 4 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

แยกชนิดของพืชไร่ผิดรวมทั้งหมด 6 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

ไม่สามารถระบุสถานะการเจริญเติบโตได้รวมทั้งหมด 58 ตำแหน่ง (จาก 420 ตำแหน่ง)

## ความสัมพันธ์ของสถานะการเจริญเติบโตที่แยกด้วยดัชนีที่คำนวณได้จากโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงกับลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืชไร่

พืชไร่แต่ละชนิดที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ ทำให้เกิดคลื่นกระเจิงที่มีสมบัติโพลาริเซชันต่างกัน เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทั้งภายในและภายนอกของพืชไร่ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยมีสาเหตุมาจากลักษณะทางพฤกษศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีที่คำนวณได้จากโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงแต่ละดัชนีจึงมีความสามารถไม่เท่ากันเพราะใช้ลักษณะสมบัติโพลาริเซชันในมุมมองที่ต่างกัน โดยสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางพฤกษศาสตร์ดังนี้

**ถั่วลิสง** การแยกสถานะการเจริญเติบโตด้วยระดับชั้นโพลาริเซชันและอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้เหมือนกัน โดยแยกได้เป็น 3 สถานะคือ  $N_A$ ,  $N_{BCDE}$  และ  $N_{FG}$  สถานะ  $N_A$  เป็นช่วงที่ถั่วลิสงเริ่มงอก ลำต้นยังมีขนาดเล็ก ผลการวัดได้รับอิทธิพลจากดินเป็นส่วนใหญ่ สถานะ  $N_{BCDE}$  เป็นช่วงที่ถั่วลิสงมีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้น โดยแต่ละกิ่งจะแผ่ขยายออกไปในแนวราบเพื่อปกคลุมผืนดิน จำนวนกิ่ง ใบ และการปกคลุมพื้นดินเพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้น ขนาดของใบแม้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออายุเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่ใช้ในระบบวัดแล้วพบว่าแตกต่างกันไม่มาก ข้อมูลจากการวัดขณะมีอายุต่างในสถานะนี้แตกต่างกันไม่มาก จึงทำให้แยกออกจากกันได้ยาก สถานะ  $N_{FG}$  เป็นช่วงที่กิ่งและใบของถั่วลิสงปกคลุมดินเต็มทั่วทั้งแปลงจึงทำให้ปลายของกิ่งแต่ละกิ่งตั้งชูขึ้นในแนวตั้ง เมื่อทิศทางการวางตัวของกิ่งและใบเปลี่ยนไปเป็นสาเหตุทำให้ผลการวัดคลื่นกระเจิงเปลี่ยนไปจึงสามารถแยกออกจากสถานะอื่นได้ การแยกสถานะด้วยองค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับ 2 วิธีแรกที่กล่าวมา แต่สามารถแยกได้มากกว่า คือสามารถแยกสถานะ  $N_{BCDE}$  ออกเป็น 2 สถานะอันได้แก่  $N_B$  และ  $N_{CDE}$  สถานะ  $N_B$  เป็นช่วงที่ลำต้นเริ่มแตกกิ่งและใบเพื่อแผ่ขยายออกไปในแนวราบและมีการปกคลุมดินยังไม่มาก ส่วนสถานะ  $N_{CDE}$  มีจำนวนกิ่งและใบมากกว่าและมีการปกคลุมดินมากขึ้น การแยกด้วยตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรสามารถแยกสถานะออกเป็น 7 สถานะคือ  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_C$ ,  $N_D$ ,  $N_E$ ,  $N_F$  และ  $N_G$  โดยข้อมูลจากการวัดในแต่ละสถานะมีการเกาะกลุ่มกันมากและแยกออกจากสถานะอื่นๆ จึงแยกออกจากกันได้ แต่พบว่าข้อมูลของสถานะ  $N_C$ ,  $N_D$  และ  $N_E$  มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับการแยกด้วยวิธีอื่นๆ ค่าที่ต่างกันมีสาเหตุมาจากลักษณะการคลุมดินที่มากขึ้นและความหนาแน่นของใบที่มากขึ้นเมื่อถั่วลิสงมีอายุมากขึ้น ส่วนข้อมูลในสถานะ  $N_F$  และ  $N_G$  มีค่าใกล้เคียงกันแต่สามารถแยกออกจากกันได้เพราะมีการชูขึ้นในแนวตั้งของกิ่งและใบเช่นเดียวกันเนื่องจากมีการ

ปกคลุมดินเต็มพื้นที่ของแปลงค่าที่แตกต่างกันของ  $N_F$  และ  $N_G$  น่าจะมีสาเหตุมาจากความชื้นของต้นถั่วลิสงที่ลดลงเมื่ออยู่ในสถานะ  $N_G$

ทานตะวัน เป็นพืชไร่ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางพฤกษศาสตร์ที่ชัดเจนกว่าถั่วลิสงและข้าวโพดหวาน เมื่อสถานะการเจริญเติบโตเปลี่ยนไป ขนาดของใบและดอกที่เปลี่ยนแปลงมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่ใช้ในระบบวัดจึงทำให้ข้อมูลจากการวัดแต่ละครั้งสามารถนำไปแยกสถานะการเจริญเติบโตได้อย่างชัดเจน การแยกด้วยองค์ประกอบ  $S_{nh}$  และ  $S_{wv}$  ร่วมกัน การแยกด้วยระดับชั้นโพลาริเซชัน และการแยกด้วยตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร สามารถแยกสถานะได้เป็น 7 สถานะเหมือนกันคือ  $S_A$   $S_B$   $S_C$   $S_D$   $S_E$   $S_F$  และ  $S_G$  โดย  $S_A$  เป็นช่วงที่ลำต้นมีขนาดเล็กผลการวัดได้รับอิทธิพลจากดินเป็นส่วนใหญ่ สถานะ  $S_B$  และ  $S_C$  เป็นช่วงที่มีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นอย่างเดียว ขนาด รูปร่าง จำนวนใบ และความสูงของลำต้น มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 จึงสามารถแยกออกจากกันได้ สถานะ  $S_D$  และ  $S_E$  เป็นช่วงที่ขนาดและจำนวนใบมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีการเจริญเติบโตของขนาดและรูปร่างของดอกที่อยู่ปลายลำต้น โดยในสถานะ  $S_D$  ดอกยังไม่บานและเงยหน้าขึ้นสู่ท้องฟ้า ส่วนสถานะ  $S_E$  ดอกเริ่มบานและเริ่มหันหน้าเอียงไปทางทิศตะวันออก สถานะ  $S_F$  เป็นช่วงที่ดอกบานเต็มที่ที่มีขนาดใหญ่ และหันหน้าไปทางทิศตะวันออก สถานะ  $S_G$  เป็นช่วงที่ทานตะวันอยู่ในระยะเก็บเกี่ยวความชื้นของส่วนต่างๆ ลดลง ลำต้นเอียงไปทางด้านหน้า และแตกต่างจากครั้งอื่นๆ ซึ่งตั้งตรงในแนวตั้ง ดอกคว่ำหน้าลงในแนวตั้ง ใบส่วนใหญ่เหี่ยวแห้งแต่ยังติดอยู่กับลำต้น ส่วนการแยกด้วยระดับชั้นโพลาริเซชันไม่สามารถแยกสถานะ  $S_D$  และ  $S_E$  ออกจากกันได้ จึงรวมเป็นสถานะเดียวกัน คือ  $S_{DE}$

ข้าวโพดหวาน แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่างของส่วนประกอบของพืชไร่ไม่ชัดเจนเท่าทานตะวัน แต่ทิศทางการวางตัวของใบที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีอายุมากขึ้นส่งผลให้คลื่นกระเจิงที่วัดได้แตกต่างกัน จึงทำให้สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับทานตะวัน โดยการแยกด้วยองค์ประกอบ  $S_{nh}$  และ  $S_{wv}$  ร่วมกัน การแยกด้วยตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร และการแยกด้วยอัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน สามารถแยกสถานะได้เป็น 7 สถานะ คือ  $C_A$   $C_B$   $C_C$   $C_D$   $C_E$   $C_F$  และ  $C_G$  โดยสถานะ  $C_A$  เป็นช่วงที่ลำต้นของข้าวโพดหวานมีขนาดเล็กผลการวัดได้รับอิทธิพลจากดินเป็นส่วนใหญ่ สถานะ  $C_B$  และ  $C_C$  การเจริญเติบโตทางด้านลำต้นมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่มีขนาดและจำนวนใบแตกต่างกันอย่างชัดเจน สถานะ  $C_D$  เป็นช่วงที่มีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นเต็มที่และเริ่มมีการเจริญเติบโตทางด้านเจริญพันธุ์ โดยมีดอกตัวผู้ตั้งชูอยู่ที่ปลายยอดของลำต้น สถานะ  $C_E$  เป็นช่วงที่ดอกตัวผู้โรย

มีการเจริญเติบโตของฝักและมีไหมงอกพันกาบหุ้มฝัก และใบเริ่มกางออก สถานะ  $C_F$  ฝักมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน และใบกางออกทำมุมกับแนวตั้งมากขึ้น และสถานะ  $C_G$  เป็นช่วงที่ข้าวโพดหวานอยู่ในระยะเก็บเกี่ยว ลำต้นมีความชื้นลดลง ใบเริ่มแห้งเหี่ยว ส่วนการแยกด้วยระดับชั้นโพลาริเซชันสามารถแยกได้เป็น 5 สถานะ เนื่องจากไม่สามารถแยกสถานะ  $C_B$  และ  $C_C$  ออกจากกันได้ และไม่สามารถแยกสถานะ  $C_D$  และ  $C_E$  ออกจากกันได้ จึงรวมเป็นสถานะ  $C_{BC}$  และ  $C_{DE}$  ตามลำดับ

### สรุปการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิง

จากการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่เพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 4 วิธีที่ผ่านมา แต่ละวิธีสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับว่าใช้ดัชนีตัวใดในการพิจารณา โดยแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่จากการวัดเก็บข้อมูล 7 ครั้ง ที่สถานะการเจริญเติบโตต่างๆ กัน แต่ครั้งวัดพืชไร่ชนิดละ 20 ตำแหน่ง จึงทำให้มีข้อมูลสำหรับการพิจารณาพืชไร่แต่ละชนิด 140 ตำแหน่ง และเมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันจะมีข้อมูลที่ต้องพิจารณา 420 ตำแหน่ง ในแต่ละวิธีจะมีการพิจารณาใน 2 ประเด็น คือ 1. พิจารณาพืชไร่ที่ละชนิด และ 2. พิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน วิธีที่ 1 ใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน วิธีนี้เมื่อพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง ทานตะวัน ข้าวโพดหวาน ได้เป็น 4 7 และ 7 ตามลำดับ ถั่วลิสงแยกสถานะได้ถูกต้อง 136 ตำแหน่ง แยกผิดสถานะ 3 ตำแหน่ง และไม่สามารถระบุสถานะได้ 1 ตำแหน่ง ส่วนทานตะวันและข้าวโพดหวานแยกสถานะได้ถูกต้องทุกตำแหน่ง เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันจะสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ตั้งแต่การวัดครั้งที่ 2 โดยสามารถแยกสถานะของพืชไร่ได้ 15 สถานะและสามารถแยกได้ถูกต้อง 358 ตำแหน่ง แยกผิดสถานะ 10 ตำแหน่ง และไม่สามารถระบุสถานะได้ 52 ตำแหน่ง วิธีที่ 2 ใช้ระดับชั้นโพลาริเซชัน วิธีนี้เมื่อพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดสามารถแยกสถานะของถั่วลิสง ทานตะวัน และข้าวโพดหวานได้เป็น 4 6 และ 5 ตามลำดับ โดยถั่วลิสงและทานตะวันสามารถแยกได้ถูกต้องทั้งหมดทุกตำแหน่ง แต่ข้าวโพดหวานแยกสถานะได้ถูกต้อง 133 ตำแหน่ง แยกผิดสถานะ 4 ตำแหน่งและไม่สามารถระบุสถานะได้ 3 ตำแหน่ง เมื่อพิจารณาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ตั้งแต่การวัดครั้งที่ 1 โดยแยกได้ทั้งสิ้น 14 สถานะ สามารถแยกได้ถูกต้อง 400 ตำแหน่ง แยกผิดสถานะ 9 ตำแหน่ง และไม่สามารถระบุสถานะได้ 11 ตำแหน่ง วิธีที่ 3 ใช้ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร โดยพิจารณาจากตำแหน่งบนทรงกลมปวงกาเรบนระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว H เท่านั้นเพราะสามารถแยกการเจริญเติบโตของ พืชไร่ได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาพืชไร่ที่ละชนิดพบว่า



สามารถแยกสถานะได้เป็น 7 สถานะทั้ง 3 ชนิดและมีความถูกต้องทั้งหมดทุกตำแหน่ง แต่เมื่อพิจารณาพีชไรท์ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันจะสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ตั้งแต่การวัดครั้งที่ 2 โดยสามารถแยกสถานะได้เป็น 18 สถานะ แยกสถานะได้ถูกต้อง 360 ตำแหน่ง แยกผิดสถานะ 14 ตำแหน่ง และไม่สามารถระบุสถานะได้ 46 ตำแหน่ง และวิธีสุดท้ายใช้อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน พบว่าเมื่อพิจารณาพีชไรท์ที่ละชนิดสามารถแยกสถานะของ ถั่วลิสง ทานตะวันและข้าวโพดหวานได้ 3 7 และ 7 สถานะตามลำดับ โดยถั่วลิสงและทานตะวันแยกได้ถูกต้องทุกตำแหน่ง ส่วนข้าวโพดหวานแยกสถานะได้ถูกต้อง 135 ตำแหน่ง แยกผิดสถานะ 4 ตำแหน่ง ไม่สามารถระบุสถานะได้ 1 ตำแหน่ง เมื่อพิจารณาพีชไรท์ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ตั้งแต่การวัดครั้งที่ 2 จึงสามารถแยกได้เป็น 14 สถานะ โดยแยกสถานะได้ถูกต้อง 352 ตำแหน่ง แยกผิด 10 ตำแหน่ง และไม่สามารถระบุสถานะได้ 58 ตำแหน่ง

การพิจารณาทั้ง 4 วิธีมีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไรท์แต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน ทานตะวันเป็นพีชไรท์ที่สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ดีที่สุด ถั่วลิสงแยกสถานะการเจริญเติบโตได้น้อยที่สุด ส่วนข้าวโพดหวานแม้จะสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับทานตะวันแต่มีความถูกต้องน้อยกว่า เมื่อพิจารณาความสามารถในการแยกสถานะของพีชไรท์ที่ละชนิดด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การใช้ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรเป็นวิธีที่ดีที่สุด และมีความถูกต้องมากที่สุด และเมื่อพิจารณาพีชไรท์ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันวิธีดังกล่าวก็ยังเป็นวิธีที่ดีที่สุดเช่นกัน แม้ว่าการใช้ระดับชั้นโพลาริเซชันจะมีความถูกต้องมากกว่าแต่ก็มีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพีชไรท์ได้น้อยกว่า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 6

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยการวัดโพลาริเซชันของคลีนกระเจิงสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ 1. การศึกษาหลักการของระบบวัดเพื่อออกแบบและสร้างระบบวัดโพลาริเซชันของคลีนกระเจิง และการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชไร่ทางด้านพฤกษศาสตร์เตรียมแปลงทดลอง และปลูกพืชไร่เพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโต 2. การวัดเก็บข้อมูลทั้งการวัดโพลาริเซชันของคลีนกระเจิงและข้อมูลของพืชไร่เพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโต 3. การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่

ระบบวัดโพลาริเซชันของคลีนกระเจิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบวัดเหมือนเอกสติกบนภาค พื้นดินที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1. เครื่องมือวัดและบันทึกผล และ 2. ชุดเสาจับสายอากาศ โดยในแต่ละส่วนต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง และสามารถนำไปใช้งานในภาคสนามตามความต้องการได้อย่างถูกต้อง ค่าที่ได้จากระบบวัดจะนำมาหาองค์ประกอบทั้ง 4 ของเมทริกซ์การกระเจิง ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานสำหรับคำนวณหาดัชนีต่างๆเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่การติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ทำโดยแยกข้อมูลออกเป็นสถานะการเจริญเติบโตต่างๆ ตามข้อมูลที่วัดได้จากพืชไร่ที่มีสถานะการเจริญเติบโตที่ต่างกันด้วยดัชนีที่คำนวณได้ 4 ดัชนี คือ 1. ค่าเฉลี่ยเลขคณิตขององค์ประกอบ  $S_{hh}$  และ  $S_{vv}$  ร่วมกัน 2. ระดับชั้นโพลาริเซชัน 3. ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร โดยพิจารณาตำแหน่งบนทรงกลมปวงกาเรบนระนาบ YZ เมื่อส่งคลื่นตกกระทบด้วยแนว H และ 4. อัตราการแบ่งแยกโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นดัชนีตัวใหม่สำหรับใช้แยกประเภทหรือสถานะของป่าที่เสนอขึ้นมาในวิทยานิพนธ์นี้ โดยแต่ละดัชนีจะมีการพิจารณาเป็น 2 ประเด็น คือ 1. พิจารณาแยกสถานะพืชไร่ที่ละชนิด 2. การพิจารณาแยกสถานะพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน ประเด็นที่ 2 นอกจากจะแยกสถานะการเจริญเติบโตแล้วยังเป็นการแยกประเภทพืชไร่ด้วย ทั้ง 4 วิธีมีการพิจารณาสมบัติโพลาริเซชันของคลีนกระเจิงจากมุมมองที่แตกต่างกัน มีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ไม่เท่ากัน สามารถแสดงตารางสรุปผลความสามารถการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่างๆ ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยดัชนีต่างๆ

ดัชนี	ถั่วลิสง		ทานตะวัน		ข้าวโพดหวาน		พืชไร่ทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน	
	จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้	จำนวนที่แยกถูกต้องได้ (จาก 140 ตำแหน่ง)	จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้	จำนวนที่แยกถูกต้องได้ (จาก 140 ตำแหน่ง)	จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้	จำนวนที่แยกถูกต้องได้ (จาก 140 ตำแหน่ง)	จำนวนสถานะการเจริญเติบโตที่แยกได้	จำนวนที่แยกถูกต้องได้ (จาก 420 ตำแหน่ง)
ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ $S_{th}$ และ $S_v$ ร่วมกัน	4	136	7	140	7	140	15	358
ระดับชั้นโพลาริเซชัน	4	140	6	140	5	133	14	400
สถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเร	7	140	7	140	7	140	18	360
อัตราส่วนการแบ่งแยกโพลาริเซชัน	3	140	7	140	7	135	14	352

ดังนั้นการติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ด้วยวิธีวัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือได้ว่าประสบความสำเร็จ เพราะสามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ทั้ง 3 ชนิดได้ โดยจากดัชนีทุกตัวทานตะวันเป็นพืชไร่ที่สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตได้ดีกว่าข้าวโพดหวานและถั่วลิสงตามลำดับ ข้าวโพดหวานนั้นแม้จะสามารถแยกจำนวนสถานะได้ใกล้เคียงกับทานตะวันแต่มีความถูกต้องน้อยกว่า การใช้ตำแหน่งสถานะโพลาริเซชันบนทรงกลมปวงกาเรเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ติดตามการเจริญเติบโตของพืชไร่ เพราะมีความสามารถในการแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ดีที่สุดแม้ว่าการใช้ระดับชั้นโพลาริเซชันจะมีความถูกต้องมากกว่าแต่มีความสามารถในการแยกสถานะน้อยกว่า

### ข้อสังเกตและข้อเสนอแนะ

1. วิทยานิพนธ์นี้วัดโพลาริเซชันของคลื่นกระเจิงโดยสนใจเฉพาะเป้าที่เป็นพืชไร่ในแปลงทดลองและเลือกวัดในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกันทุกครั้ง หากสภาพแวดล้อมมีความแตกต่างกันมาก เช่น อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นของอากาศ ความชื้นของดิน และความเร็วของลมขณะวัด เป็นต้น เพราะค่าต่างๆ เหล่านี้ย่อมส่งผลกระทบต่อคลื่นกระเจิงที่วัดได้ และถ้าค่าเหล่านี้มีความแตกต่างกันมากย่อมทำให้คลื่นกระเจิงที่วัดได้ผิดพลาดไปมากและอาจมีอิทธิพลเหนือเป้าที่ต้องการวัดได้

2. ระบบวัดที่สร้างขึ้นแม้จะสามารถใช้งานได้ตามจุดประสงค์ทุกประการแต่ก็ยังใช้เวลาในการวัดเก็บข้อมูลแต่ละครั้งนาน ดังนั้นการพัฒนาบบวัดต่อไปควรหาวิธีเพื่อให้ใช้เวลาในการวัดลดลง เพื่อความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น

3. การวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การปรับเทียบด้วยแผ่นสะท้อนที่ทำจากสังกะสี  $2.4 \times 2.4$  ตารางเมตร การเปลี่ยนวิธีการปรับเทียบที่เหมาะสมสามารถทำให้ได้ข้อมูลที่มีความหลากหลายมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น และลักษณะของข้อมูลอาจจะน่าสนใจมากขึ้น

4. แม้วิทยานิพนธ์นี้สามารถแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้แต่เป็นการศึกษาจากการทดลองในสภาพแวดล้อมที่จัดไว้เพียงครั้งเดียว ยังมีประเด็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับเป้าที่เป็นชนิดเดียวกันแต่ต่างสถานะกันที่ต้องศึกษาต่อไปในอนาคต เช่น แม้เป็นพืชไร่ชนิดเดียวกัน ปลูกที่เดียวกัน หากปลูกในฤดูที่แตกต่างกันก็จะมีรายละเอียดที่ต่างกันไป หรือเมื่อถูกรบกวนด้วยโรคและแมลงก็จะทำให้วงจรชีวิตของพืชไร่เปลี่ยนไป ทำให้ผลการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงเปลี่ยนไปด้วย

5. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอดัชนีเพื่อแยกสถานะการเจริญเติบโตของพืชไร่ได้ แต่ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่ชัดเจนของเป้ากับสมบัติโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงได้ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Ulaby, F. T. and Elachi, Charles. Radar Polarimetry for Geoscience Application. 1<sup>st</sup> edition. Norwood : Artech House, 1989.
2. Ulaby, F. T., Whitt, M. W. and Sarabadi, K. AVNA-based Polarimetric Scatterometers. IEEE Antennas and Propagation magazine (October, 1990) : 6-17.
3. Dobson, M. C., Pience, L. E. and Ulaby, F. T. Knowledge-Based Land-Cover Classification using BRS-1/IBRS-1 SAR Composites. IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing 34, 1, (January, 1996) : 83-98.
4. Yuch, S. H. and others. Sea Ice Identification Using Dual-Polarized Ku-Band Scatterometer Data. IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing 35, 5, (May, 1997) : 560-569.
5. Liew, S. C., Kam, S. P., Tuong, T. P., Chen, P., Minh, V. Q. and Lim, H. Landcover Classification over the Mekong River Delta using ESR and RADARSAT SAR Image. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35, 7, (July, 1997) : 592-598.
6. Woodhouse, I. H. and Hoekman, D. H. Modelling of Microwave Backscatter Using A Tree-Growth Model For Boreal Forests Within The NOPEX Test Site. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 34, 4, (April, 1996) : 386-397.
7. พีระพงษ์ อู่ทวารสกุล. การแยกพืชไร่ด้วยการวัดโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
8. Ulaby, F. T. and others. Millimeter-Wave Bistatic From Ground and Vegetation Targets. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 26, 3, (May, 1988) : 229-243.
9. Ulaby, F. T. Radar Response to Vegetation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 23, 1, (January, 1975) : 36-45.
10. Boerner, W. M., Yan, W.-L., Xi, A.-Q., Yamaguchi, Y. On the Basic Principles of Radar Polarimetry: the Target Characteristic Polarization State Theory of

- Kennaugh, Huynen's Polarization Fork Concept, and its Extension to the Partially Polarized Case. Proceedings of The IEEE 79, 10, (October, 1991) : 1538-1549.
11. Tragl, K. Polarimetric Radar Backscattering From Reciprocal Random Targets. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 28, 5, (September, 1980) : 856-864.
  12. Hisoswa, H. Degree of Polarization of Radar Backscatters from a Mired Target. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35, 2, (March, 1997) : 466-470.
  13. Guissard, A. Mueller and Kennaugh Matrices in Radar Polarimetry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 32, 3, (May, 1994) : 590-597.
  14. คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ไร่นา. พืชเศรษฐกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.
  15. ชูศรี คำลี. การศึกษาการเจริญเติบโตของถั่วลิสงในสองแหล่งปลูก. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ไร่นา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2533.
  16. ศุภางค์ ทิพย์พิทักษ์. อิทธิพลของกรดจิบเบอเรลลิกที่มีต่อทานตะวัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาพฤกษศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2519.
  17. ประชา จำปาด้ง. ผลของระยะเวลาปลูกต่อผลผลิตและคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวาน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ไร่นา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2527.
  18. Lo, Y. T. and Lee, S. W. Antennas Handbook III. 3<sup>rd</sup> edition. Van Nostrand : Reinhold, 1993.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรรณณะ กษานติกุล เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2519 ที่อำเภอเมืองฯ จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 โดยได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาและวิจัยจากโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย