



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนากล้องโพลาไรเซชันเพื่อศึกษาปรากฏการณ์โพลาไรซ์
ของเมล็ดข้าวสายพันธุ์ไทย

THE DEVELOPMENT OF POLARIZATION CAMERA TO STUDY
POLARIZED PHENOMENON OF THAI RICES

ดร.ประธาน บุรณศิริ

นายกาญปัญญา สุวรรณสุขโข

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประเภทส่งเสริมนักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ 2552

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RC H

TR

590

1281ก

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 131049

วัน,เดือน,ปี. 2.1.11.2557

b. 12596668

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารไปใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องสมุด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนากล้องโพลาไรเซชันเพื่อศึกษาปรากฏการณ์โพลาไรซ์ของ

เมล็ดข้าวสาลีพันธุ์ไทย

แหล่งเงินทุน

จากเงินรายได้ประเภทส่งเสริมนักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ

2552

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย

1 ปี ตั้งแต่

ต.ค. 2551 ถึง ก.ย. 2552 /

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ ดร.ประธาน บุรณศิริ คณะวิทยาศาสตร์

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นายกาญปัญญา สุวรรณสุข คณะวิทยาศาสตร์

บทคัดย่อ

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก และมีหลากหลายสายพันธุ์ แต่ละพันธุ์ก็มีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปเช่นรูปร่าง สี กลิ่น เป็นต้น แต่การแยกแยะเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยสายตาเปล่านั้นทำได้ยากมาก อย่างไรก็ตาม ข้าวแต่ละชนิดเมื่อนำมาละลายน้ำย่อมมีการละลายที่ไม่เท่ากัน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นไม่เท่ากัน ทำให้ดรรชนีหักเหแสงแตกต่างกันด้วย ซึ่งดรรชนีหักเหที่ต่างกัน จะมีมุมบริวสเตอร์ (Brewster angle) ที่ต่างกันด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนากล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้ เพื่อสามารถปรับความสว่างของแสงก่อนที่จะบันทึกภาพ และเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในการสะท้อนแสงของข้าวแต่ละสายพันธุ์ จากผลการทดลองพบว่าการหมุนแผ่นโพลาไรเซอร์สามารถปรับลดความเข้มของแสงที่สะท้อนจากข้าวด้วยมุมบริวสเตอร์ ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : พันธุ์ข้าว กล้องโพลาไรซ์ มุมบริวสเตอร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ธรรมชาติของแสง	4
2.2 โพลาริเซชัน	8
2.3 ชนิดของแสงโพลาไรเซชัน	9
2.3.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น	9
2.3.2 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม	10
2.3.3 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี	12
2.4 การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นคลื่นแสงโพลาไรซ์	15
2.4.1 โพลาไรเซชันโดยการเลือกดูดกลืน	15
2.4.2 โพลาไรเซชันโดยการสะท้อน	16
2.4.3 โพลาไรเซชันโดยการหักเหซ้อน	17
2.4.4 โพลาไรเซชันโดยการกระเจิง	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	19
3.2 การจัดระบบการทดลอง	19
3.3 วิธีการและขั้นตอนการดำเนินงาน	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	22
4.1 มุมบรีวสเตอร์ของน้ำ	22
4.2 แสงสะท้อนจากน้ำที่มุมบรีวสเตอร์	23
4.3 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุชัยนาทที่มุมบรีวสเตอร์	26
4.4 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุขาวดอกมะลิ 105 ที่มุมบรีวสเตอร์	30
4.5 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุปทุมธานี 1 ที่มุมบรีวสเตอร์	34
4.6 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60 ที่มุมบรีวสเตอร์	38
4.7 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ กข. 23 ที่มุมบรีวสเตอร์	42
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะในการสร้างอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น	47
เอกสารอ้างอิง	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงหน้าคลื่นของแสงแบบวงกลมและแบบระนาบ	5
รูปที่ 2.2	แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหโดย $n_2 < n_1$ θ_1 เป็นมุมตกกระทบ θ_2 เป็นมุมหักเห	6
รูปที่ 2.3	แสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสงในตัวกลางแก้ว (n_1) และอากาศ (n_2)	7
รูปที่ 2.4	แสงแบบไมโพลาไรซ์เคลื่อนที่ในทิศ z และสนามไฟฟ้าที่อยู่ในทิศ x และ y	8
รูปที่ 2.5	เวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์แบบเส้นตรง	8
รูปที่ 2.6	ก) แสงไมโพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ จะได้แสงแบบโพลาไรซ์ ข) แสงไมโพลาไรซ์ไม่สามารถผ่านแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นที่มีทิศของโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน	9
รูปที่ 2.7	แสดงการโพลาไรซ์ของแสงแบบเชิงเส้นที่เคลื่อนที่ในแนวแกน z	10
รูปที่ 2.8	ก) แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา หรือตามเข็มนาฬิกา ข) แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้าย หรือทวนเข็มนาฬิกา	11
รูปที่ 2.9	แสดงการหมุนของเวกเตอร์ไฟฟ้าในกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา	11
รูปที่ 2.10	แสดงการกำหนดทิศทางของการหมุนสำหรับโพลาไรซ์ชนิดวงรี	13
รูปที่ 2.11	แสดงลักษณะทั่วไปของคลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงรี	14
รูปที่ 2.12	การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น การโพลาไรซ์แบบวงกลม และการโพลาไรซ์แบบวงรี	14
รูปที่ 2.13	โพลาไรเซชันโดยการเลือกดูดกลืนด้วยแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่น	15
รูปที่ 2.14	การทำให้แสงไมโพลาไรซ์เป็นแสงแบบโพลาไรซ์โดยการสะท้อน	16
รูปที่ 2.15	แสงโพลาไรซ์โดยการหักเหสองแนว	17
รูปที่ 2.16	แสงโพลาไรซ์จากการกระเจิงของแสง	18
รูปที่ 3.1	แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อสร้างต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่ปรับโพลาไรซ์ได้	20
รูปที่ 3.2	แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูป 3.1	20
รูปที่ 4.1	แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อคำนวณหามุมบริวสเตอร์	22
รูปที่ 4.2	แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 90 องศา	23
รูปที่ 4.3	แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 75 องศา	23
รูปที่ 4.4	แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 60 องศา	24
รูปที่ 4.5	แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 45 องศา	24
รูปที่ 4.6	แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 30 องศา	25
รูปที่ 4.7	แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 15 องศา	25
รูปที่ 4.8	แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 0 องศา	26

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.9	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา	27
รูปที่ 4.10	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา	27
รูปที่ 4.11	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 60 องศา	28
รูปที่ 4.12	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 45 องศา	28
รูปที่ 4.13	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 30 องศา	29
รูปที่ 4.14	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 15 องศา	29
รูปที่ 4.15	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 0 องศา	30
รูปที่ 4.16	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา	31
รูปที่ 4.17	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา	31
รูปที่ 4.18	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 60 องศา	32
รูปที่ 4.19	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 45 องศา	32
รูปที่ 4.20	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 30 องศา	33
รูปที่ 4.21	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 15 องศา	33
รูปที่ 4.22	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 0 องศา	34
รูปที่ 4.23	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา	35
รูปที่ 4.24	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา	35
รูปที่ 4.25	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 60 องศา	36
รูปที่ 4.26	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 45 องศา	36
รูปที่ 4.27	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 30 องศา	37
รูปที่ 4.28	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 15 องศา	37
รูปที่ 4.29	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 0 องศา	38
รูปที่ 4.30	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา	39
รูปที่ 4.31	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา	39
รูปที่ 4.32	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 60 องศา	40
รูปที่ 4.33	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 45 องศา	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.34	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 30 องศา	41
รูปที่ 4.35	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 15 องศา	41
รูปที่ 4.36	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 0 องศา	42
รูปที่ 4.37	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา	43
รูปที่ 4.38	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา	43
รูปที่ 4.39	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 60 องศา	44
รูปที่ 4.40	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 45 องศา	44
รูปที่ 4.41	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 30 องศา	45
รูปที่ 4.42	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 15 องศา	45
รูปที่ 4.43	แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 0 องศา	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารประจำวันมากกว่าในภูมิภาคอื่นๆของโลก การผลิต บริโภคและการค้าข้าวส่วนใหญ่จึงกระจุกตัวอยู่ในทวีปเอเชีย แต่ข้าวที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะใช้ในการบริโภคภายในประเทศ ทำให้มีข้าวเพียงร้อยละ 6 เท่านั้นที่เข้าสู่ตลาดการค้าข้าวระหว่างประเทศ โดยประเทศที่มีบทบาทมากที่สุดในการส่งออกข้าว คือประเทศไทย รองลงมาคือ อินเดีย เวียดนาม จีนและพม่า ตามลำดับ โดยไทยส่งออกข้าวปีละประมาณ 7 ล้านตัน เป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 30 ของการส่งออกข้าวทั้งหมดทั่วโลก

ข้าวที่นำมาปลูกเป็นอาหารนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ข้าว *Oryza sativa* ปลูกในทวีปเอเชียและ *Oryza glaberrima* ปลูกในทวีปแอฟริกา แต่ข้าวที่ค้าขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดเป็นข้าวที่ปลูกจากแถบเอเชีย ซึ่งข้าวชนิดดังกล่าวยังสามารถแบ่งได้ตามแหล่งปลูกอีก คือ

ข้าวอินดิกา (*Indica*) มีลักษณะเมล็ดยาวรี ต้นสูง เป็นข้าวที่ปลูกในเอเชียเขตร้อน ตั้งแต่ จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย อินเดีย และศรีลังกา ข้าวพันธุ์นี้ค้นพบครั้งแรกในประเทศอินเดียและต่อมาได้พัฒนาไปปลูกที่ทวีปอเมริกา

ข้าวจาปอนิกา (*Japonica*) เป็นข้าวที่ปลูกในเขตอบอุ่น เช่น จีน ญี่ปุ่น เกาหลี มีลักษณะเมล็ดป้อมกลมรี ต้นเตี้ย

ข้าวจาวานิกา (*Javanica*) ปลูกในประเทศอินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ มีเมล็ดป้อมใหญ่ แต่ไม่ได้รับความนิยมเพราะให้ผลผลิตต่ำ

สำหรับข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นพันธุ์ข้าวเมล็ดยาว คือ ข้าวอินดิกา แต่ประกอบด้วยหลายพันธุ์ทั้งที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ และข้าวพันธุ์พื้นเมืองซึ่งมีอยู่ประมาณ 3,500 พันธุ์ ซึ่งมีข้าวป่า ข้าวพื้นเมือง และข้าวที่ผสมโดยมนุษย์ขึ้นมาใหม่ แต่ข้าวพันธุ์ที่สร้างชื่อเสียงให้กับไทยมากที่สุด คือ ข้าวหอมมะลิ

ข้าวหอมมะลิหรือข้าวดอกมะลิ เป็นข้าวที่มีความไวต่อช่วงแสง หมายถึง พันธุ์ข้าวจะออกดอกในช่วงวันที่มีกลางวันยาวกว่ากลางคืน นั่นคือ ช่วงฤดูหนาวทำให้สามารถปลูกได้เฉพาะนาปีเท่านั้น ส่วนชื่อเรียกว่า ข้าวหอมมะลินั้นมีที่มาจากสีของข้าวที่ขาวเหมือนดอกมะลิ แต่มีกลิ่นหอมเหมือนใบเตย ไม่ได้หมายความว่าข้าวนั้นหอมเหมือนมะลิ ลักษณะที่สำคัญของข้าวหอมมะลิ คือ เมื่อบึ่งหรือหนึ่งสุกแล้วเมล็ดข้าวสุกจะอ่อนนิ่มมากกว่าข้าวเจ้าทั่วไป แต่ร่วนน้อยกว่าและมีกลิ่นหอม

ข้าวที่ปลูกเพื่อใช้เป็นข้าวหอมมะลิมี 2 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ กข.15 ซึ่งข้าว กข.15 ก็คือข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่นำไปอาบรังสีแกมมาทำให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ประมาณ 4-6 % ซึ่งข้าวทั้งสองพันธุ์นี้มีลักษณะ คือ เมล็ดข้าวจะฟักตัวในเวลาประมาณ 8 สัปดาห์ เมล็ดมีเปลือกสีน้ำตาล ยาว 7.4 มม.รูปร่างเรียวยาว เมื่อข้าวสุกจะหอมนุ่ม มีอะมิโลส (amylose) 14-17 % ปลูกได้ในที่นาดอนทั่วไป ทนแล้ง ดินเปรี้ยว ดินเค็ม ด้านทานไส้เดือนฝอย รากปม ไม่ต้านทานโรคไหม้ โรคขอบใบแห้ง เพี้ยกระโดดสีน้ำตาล และหนอนกอ

การวิเคราะห์เพื่อแยกพันธุ์ข้าวจึงมีความจำเป็นอย่างมาก แต่การแยกแยะด้วยสายตานั้นเป็น สิ่งที่ยากมาก อย่างไรก็ตามข้าวต่างชนิดกันจะมีเนื้อสีที่แตกต่างกัน เมื่อละลายน้ำในความเข้มข้น เดียวกันจะทำให้มีดัชนีหักเหแสงแตกต่างกัน ดังนั้นเราสามารถใช้ในการสร้างแสงโพลาไรซ์โดยการ สะท้อนของที่ เมื่อให้แสงตกกระทบที่มุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle) เพื่อสังเกตความแตกต่าง ของดัชนีหักเห ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างต้นแบบกล้องโพลาไรซ์เพื่อใช้แยกพันธุ์ข้าว 5 สายพันธุ์ โดยอาศัยหลักการโพลาไรซ์ของแสงที่มุมตกกระทบ Brewster

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสร้างต้นแบบระบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้
2. เพื่อเปรียบเทียบแสงโพลาไรซ์ที่ได้จากข้าวพันธุ์ต่างๆ
3. เพื่อศึกษาหลักการโพลาไรซ์ของแสงจากการสะท้อน
4. เพื่อศึกษาพัฒนาศักยภาพของอาจารย์และนักศึกษาที่ทำงานวิจัยนี้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสร้างแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อนของแสง เมื่อแสงตกกระทบที่ มุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle) โดยการปรับแผ่นโพลาไรซ์ที่หน้ากล้องถ่ายรูป ซึ่งแผ่นโพลาไรซ์ จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม Lab VIEW จากนั้นทำการเปรียบเทียบภาพถ่ายแสงโพลาไรซ์ของข้าว 5 สายพันธุ์ได้แก่ ชัยนาท, ขาวดอกมะลิ 105, ปทุมธานี 1, สุพรรณบุรี 60 และ กข 23 และนำมา วิเคราะห์ความแตกต่างของภาพถ่ายการโพลาไรซ์ของข้าวสายพันธุ์ต่างๆ

1.4 ขั้นตอนของงานวิจัยและวิธีดำเนินงาน

1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ ข้าวสายพันธุ์ต่างๆที่นำมาทดลอง ธรรมชาติของแสง และการสร้างแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อนของแสงผ่านตัวกลาง หลักการทำงาน เบื้องต้น และอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้งานในการสร้าง ศึกษาผลการทดลอง และศึกษาการ ทดลองที่ผ่านมา ของผู้ที่ได้ทำการอธิบาย และทดลองมาแล้ว เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง รวมทั้ง โปรแกรมที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองด้วย

2. วางแผนการสร้างระบบการทดลองการสร้างต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโฟลาไรซ์ได้ จากแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อนอย่างง่าย พร้อมสรุปทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ และออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบการทดลองที่ออกแบบขึ้น
3. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบการสร้างแสงโพลาไรซ์แบบสะท้อน และเริ่มทำการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงต่างๆที่ได้ออกแบบไว้
4. ทำการทดลองและวัดผลการทำงานที่สร้างขึ้นและนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิเคราะห์ ทำการปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆเพื่อประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น
5. สรุปผลการทำงาน การทดลองต่างๆ และรายงานผลการทดลองที่ได้ จากนั้นนำระบบการทดลองที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้
- 1.5.2 สามารถแยกพันธุ์ข้าวได้ โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของโพลาไรซ์
- 1.5.3 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการสร้างแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน ที่มุมตกกระทบ Brewster

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องการควบคุมทิศทางของแสงโพลาไรซ์นี้สิ่งแรกที่จำเป็นคือ ต้องศึกษาปรากฏการณ์พื้นฐานของแสงก่อน รวมทั้งคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย ภายในบทนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ โพลาไรเซชันของแสง และการทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์ ซึ่งจะเสนอเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้ คือ

2.1 ธรรมชาติของแสง

แสงเป็น “พลังงาน” ที่ทำให้ประสาทตาของคนปกติเกิดความรู้สึกในการมองเห็นและสามารถเปลี่ยนรูปกับพลังงานรูปอื่นได้

ในราวกลางศตวรรษที่ 17 ที่ผ่านมามีคนโดยทั่วไปเชื่อว่า แสงประกอบด้วยลำอนุภาคเล็กๆ ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง เช่น ดวงอาทิตย์ โดยอนุภาคเล็กๆ เหล่านี้จะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงในแนวเส้นตรง แสงจะผ่านวัตถุโปร่งแสงไปได้ แต่ถ้าตกกระทบวัตถุทึบแสงจะสะท้อนกลับมา และเมื่ออนุภาคเล็กๆ เหล่านี้กระทบกับดวงตา จะทำให้เราสามารถมองเห็นวัตถุได้ และสามารถที่จะใช้ทฤษฎีของอนุภาคนี้อธิบายการเดินทางเป็นเส้นตรง การสะท้อนกลับจากผิวเรียบ เช่น กระจกเงา ด้วยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ และการหักเหเมื่อเคลื่อนผ่านตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง เช่น จากอากาศไปยังน้ำ

ในขณะที่เดียวกันมีนักวิทยาศาสตร์บางคนเกิดความคิดว่า แสงบางที่อาจไม่ใช่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ เพียงอย่างเดียว แต่อาจจะเป็นคลื่นบางชนิดก็ได้ ในปี ค.ศ. 1670 ฮอยเกนส์ (Huygens) ได้อธิบายให้เห็นว่า กฎการสะท้อนและการหักเหสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่น และยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์ใหม่ได้อีกด้วย เช่น การหักเหเชิงซ้อน แต่ในขณะนั้นคนส่วนใหญ่ยังไม่ยอมรับฟังความคิดนี้ จึงมีข้อขัดแย้งเกิดขึ้นกล่าวคือ ถ้าแสงเคลื่อนที่เป็นคลื่นจริงแล้วก็ย่อมสามารถมองเห็นแสงอ้อมผ่านมุมห้องได้ ทั้งนี้เพราะคลื่นสามารถอ้อมผ่านวัตถุได้ อย่างไรก็ตามความยาวช่วงคลื่นของคลื่นแสงนั้นสั้นมาก ซึ่งแม้แสงจะสามารถหักเหผ่านสิ่งกีดขวางได้ก็ตามก็ยังไม่สามารถเห็นได้ ผู้สังเกตเห็นปรากฏการณ์อันนี้คือ กริมาดิ (Grimadi) ในปี ค.ศ. 1965 และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction of Light)

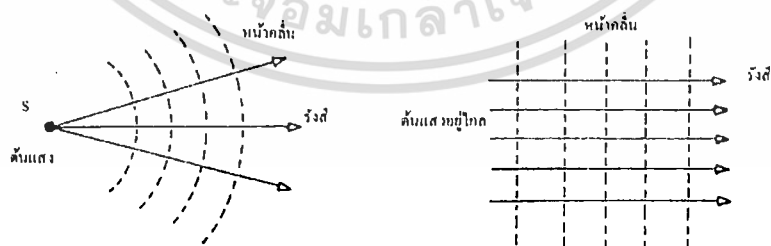
ในปี ค.ศ. 1827 ยัง (Young) และเฟรสเนล (Fresnel) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่อง การแทรกสอดของแสง (Interference) และการวัดความเร็วของคลื่นแสงในของเหลว ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ทฤษฎีของอนุภาคอย่างเดียวไม่เพียงพอ ต้องใช้ปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงมาอธิบายด้วย

ในปี ค.ศ. 1873 แมกซ์เวลล์ (Maxwell) นักวิทยาศาสตร์ชาวสกอตได้พิสูจน์ให้เห็นว่าวัตถุที่สามารถสั่น (Oscillate) ได้จะต้องแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น

สามารถคำนวณได้ประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที ซึ่งค่าที่ประมาณได้นี้จะเท่ากับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงที่วัดได้จริงๆ จากหลักฐานที่ได้นี้จึงยืนยันได้ชัดเจนว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวช่วงคลื่นสั้นมาก ภายหลังจากการทดลองของแมกซ์เวลล์แล้ว ในปี ค.ศ. 1888 เฮิร์ต (Hertz) ได้ใช้วงจรกำเนิดความถี่สร้างคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก เรียกว่า ไมโครเวฟ (Microwave) และแสดงให้เห็นว่าคลื่นนี้มีคุณสมบัติของคลื่นแสงครบทุกประการ กล่าวคือ สะท้อนได้ หักเหได้ โฟกัสไปรวมกันที่จุดหนึ่งโดยใช้เลนส์ได้ และมีคุณสมบัติโพลาไรซ์ได้เช่นเดียวกับคลื่นแสง ดังนั้นทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ และการทดลองของเฮิร์ตจึงนำมาสู่ความคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในราวศตวรรษที่ 19 ผู้คนส่วนใหญ่จึงเชื่อกันว่าแสงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ยังไม่สามารถที่จะอธิบายถึงปรากฏการณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวของตัวนำเมื่อมีคลื่นมาตกกระทบผิวของตัวนำนั้นได้

ในปี ค.ศ. 1905 ไอสไตน์ (Einstein) ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า พลังงานของแสงแทนที่จะปล่อยออกมาผ่านบรรยากาศในรูปของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า นั้นกลับรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า โฟตอน (Photon) โดยโฟตอนแต่ละกลุ่มจะมีความถี่โดยเฉพาะ และมีพลังงานแปรผันตามความถี่ของขบวนการปลดปล่อยเนื่องจากไฟฟ้าพลังแสง (Photoelectric emission) ซึ่งขึ้นอยู่กับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอนไปสู่อิเล็กตรอน และต่อมา มิลลิแกน (Millikan) ได้ทำการทดลองซึ่งสรุปผลที่ได้จากการทดลองได้ว่า พลังงานจลน์ของโฟตอนนั้นเป็นไปตามทฤษฎีของไอสไตน์ทุกประการ

เมื่อแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงพิจารณาคลื่นแสงด้วยการพิจารณาหน้าคลื่น (Wave Fronts) โดยมีแหล่งกำเนิดของคลื่นแสงเล็กๆ เป็นจุดศูนย์กลางรวมอยู่ที่ต้นกำเนิดตามรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาด้วยหน้าคลื่นทรงกลม (Spherical Wave Fronts) และจุดที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดแสงมากๆ รัศมีของหน้าคลื่นทรงกลมก็จะใหญ่มาก ดังนั้นจึงสามารถที่จะมองหน้าคลื่นที่อยู่ห่างจากจุดกำเนิดมากๆ นี้เป็นหน้าคลื่นระนาบ (Plane Wave Fronts) จากแนวความคิดนี้จึงทำให้สะดวกมากในการมองรังสีของแสง เพราะรังสีจะแสดงการไหลของพลังงานในลำแสง

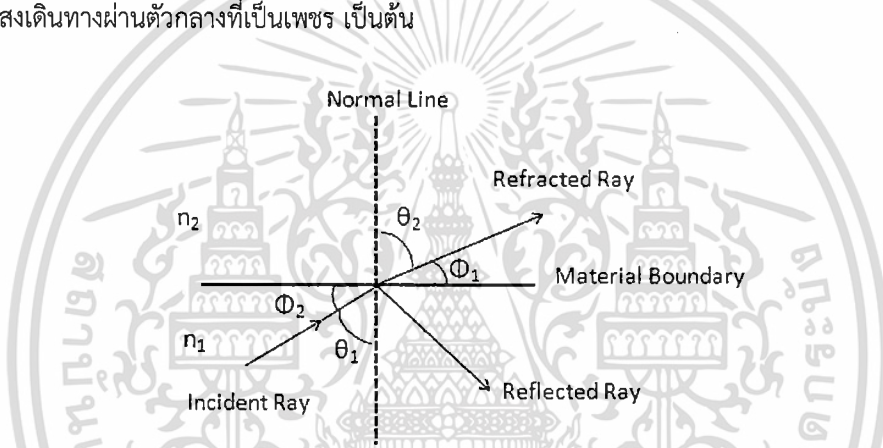


รูปที่ 2.1 แสดงหน้าคลื่นของแสงแบบวงกลมและแบบระนาบ

เมื่อพิจารณาการเดินทางของแสงผ่านตัวกลางใดๆ จะพบว่าแสงมีความเร็วที่แตกต่างกันไป เนื่องจากค่าดัชนีหักเหในตัวกลางนั้นแตกต่างกัน ซึ่งค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางนิยามได้ว่า “เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศและความเร็วของแสงในตัวกลางที่แสงผ่าน” ถ้าให้ n เป็นดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางใดๆ จะได้ว่า

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

เมื่อ c คือค่าความเร็วของแสงในสุญญากาศซึ่งมีค่าประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที และ v คือความเร็วของแสงในตัวกลางใดๆ โดยค่า n จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อแสงเดินทางผ่านสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 1.33 เมื่อแสงเดินทางผ่านน้ำ มีค่าเท่ากับ 1.5 เมื่อแสงเดินทางผ่านแก้ว และมีค่าเท่ากับ 2.42 เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นเพชร เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหโดย $n_2 < n_1$ θ_1 เป็นมุมตกกระทบ θ_2 เป็นมุมหักเห

เพื่อให้เข้าใจแนวคิดของการสะท้อนและการหักเหของแสงให้ง่ายขึ้นจะพิจารณาคุณสมบัติของรังสีของแสง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเดินทางของแสงผ่านตัวกลาง นั่นคือเมื่อรังสีของแสงเดินทางไปตกกระทบตัวกลางที่ต่างกันสองชนิด แสงส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางแรกและจะมีแสงอีกส่วนหนึ่งที่เหลืออยู่จะเกิดการเลี้ยวเบน (หักเห) เข้าไปในตัวกลางที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเมื่อกำหนดให้ $n_2 < n_1$ แล้วการเลี้ยวเบนหรือการหักเหของแสงที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสองตัวกลางนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความเร็วแสงในตัวกลางทั้งสอง โดยมีความสัมพันธ์จากรอยต่อของตัวกลางทั้งสองเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) และกำหนดจาก

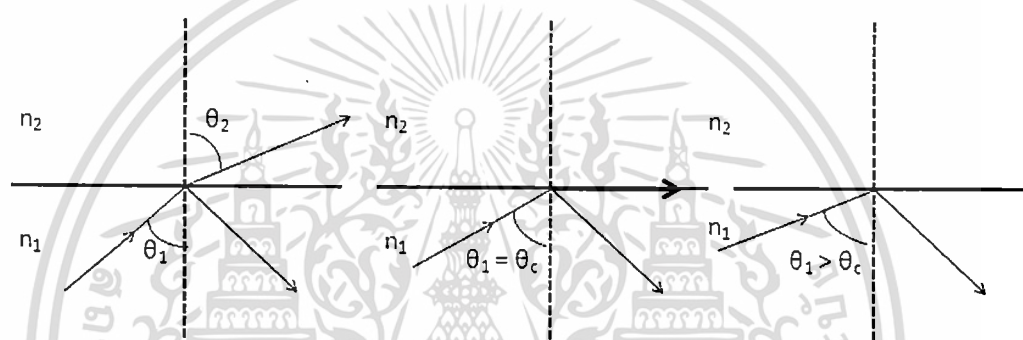
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

หรือเท่ากับ

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.3)$$

ซึ่งกำหนดมุมตั้งรูปที่ (2.2) ดังนั้นแสงที่เดินทางไปตกกระทบกับรอยต่อของตัวกลางทั้งสองซึ่งทำมุม θ_1 จะต้องเท่ากับมุมของแสงที่สะท้อนออกจากตัวกลางทั้งสองนี้

เมื่อพิจารณาในกรณีที่แสงเดินทางผ่านตัวกลางที่ทึบกว่า (มีค่าดัชนีหักเหสูง) ไปยังตัวกลางที่เบาบางกว่า โดยทำมุมเป็น θ_1 เมื่อตกกระทบกับตัวกลางก็จะเกิดการหักเหเป็นมุม θ_2 เมื่อแสงทำมุมที่เป็นมุมเท่ากับมุมวิกฤติแล้วแสงส่วนหนึ่งจะเดินทางเป็นมุมหักเหขนานกับผิวของตัวกลาง ถ้ามุมของแสงตกกระทบยิ่งโตขึ้นก็จะเกิดการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection) ของแสงภายในตัวกลางนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสงในตัวกลางแก้ว (n_1) และอากาศ (n_2)

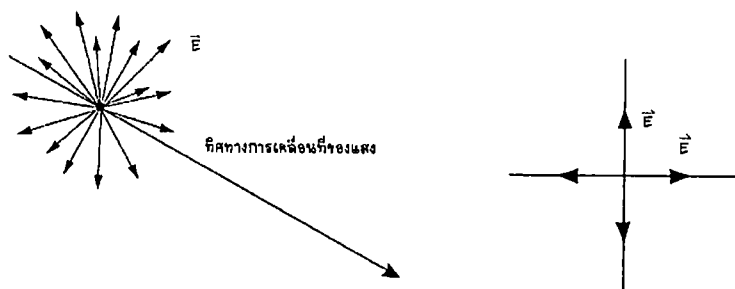
พิจารณาตัวกลางที่เป็นแก้วกับอากาศ ดังรูปที่ 2.3 เมื่อแสงผ่านพื้นผิวของแก้วไปตกกระทบกับตัวกลางที่เป็นอากาศ ถ้า θ_2 เท่ากับ 90° องศา ดังนั้น $\sin \theta_1$ เท่ากับ 1 มุมวิกฤติในตัวกลางที่เป็นแก้วจะมีค่า

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

เมื่อ θ_c คือมุมวิกฤติ (Critical Angle)

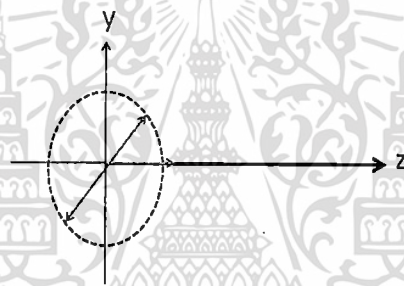
2.2 โพลาริเซชัน

แสงจากแหล่งกำเนิดทั่วไป เช่น ดวงอาทิตย์ หลอดไฟ มักเป็นแสงแบบไม่โพลาไรซ์ (unpolarized light) กล่าวคือ มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ทุกทิศทุกทางและตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของแสง ดังรูปที่ 2.3 โดยแสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่อยู่ในระนาบ xy และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงที่ชี้ไปทางแกน z ซึ่งพบว่าทิศของสนามไฟฟ้าของแสงอยู่ทุกทิศทุกทาง



รูปที่ 2.4 แสงแบบไม่โพลาไรซ์เคลื่อนที่ในทิศ z และสนามไฟฟ้าที่อยู่ในทิศ x และ y

หากแสงนั้นมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ในแนวใดแนวหนึ่งเท่านั้น เช่น อยู่ในแกน y เท่านั้น หรือ ทำมุมค่าหนึ่ง ๆ กับแกน x เท่านั้น เราเรียกแสงที่มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในลักษณะนี้ว่า แสงโพลาไรซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

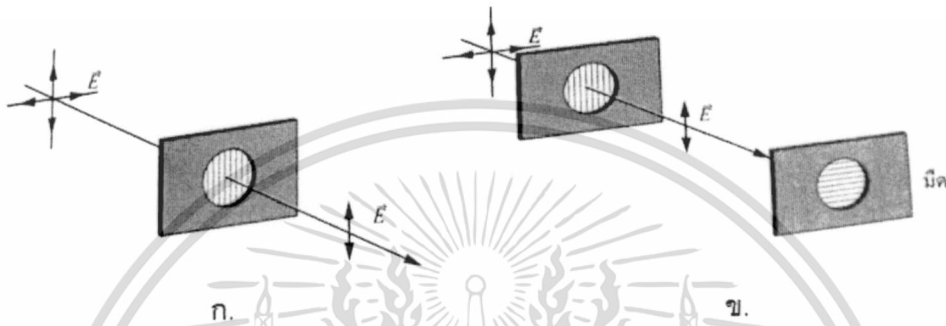


รูปที่ 2.5 เวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์แบบเส้นตรง

ตาของคนเราไม่สามารถบอกความแตกต่างระหว่างแสงโพลาไรซ์กับแสงไม่โพลาไรซ์ได้ จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์อื่นช่วย ซึ่งอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบว่าแสงนั้นเป็นแสงโพลาไรซ์หรือไม่ และสะดวกต่อการใช้งานก็คือ แผ่นโพลาไรซ์ (Polaroid sheet)

แผ่นโพลาไรซ์ คือ แผ่นฟิล์มที่ฉาบด้วยผลึกของไอโอดควินินซัลเฟต (Iodoquinine sulfate) ซึ่งมีการวางตัวแบบขนาน เป็นผลให้มีการดูดกลืนสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกันกับผลึกบนแผ่นโพลาไรซ์ ปัจจุบันมีการผลิตแผ่นโพลาไรซ์ที่เป็นแผ่นพลาสติกที่มีโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ผังอยู่ในเนื้อพลาสติก และแผ่นพลาสติกถูกยึดให้โมเลกุลยาวเรียงตัวในแนวขนานกัน เมื่อแสงผ่านแผ่นโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าที่มีทิศตั้งฉากกับแนวการเรียงตัวของโมเลกุลจะผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกไปได้ ส่วนสนามไฟฟ้าที่มีทิศขนานกับแนวการเรียงตัวของโมเลกุลจะถูกดูดกลืน เราเรียกแนวที่ตั้งฉากกับแนวการเรียงตัวของผลึกหรือโมเลกุลบนแผ่นโพลาไรซ์นี้ว่า แกนโพลาไรซ์ชันของแผ่นโพลาไรซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์ที่มีทิศตั้งฉากกับทิศของโพลาไรซ์จะถูกดูดกลืน ส่วนสนามไฟฟ้าที่มีทิศขนานกับทิศของโพลาไรซ์ จะผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกมาดังรูป 2.6 (ก) ดังนั้นแสงที่ผ่านแผ่นโพลา

รอยต์ออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์ในแนวตั้ง แต่เมื่อให้แสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นที่วางขนานกัน ขณะหมุนแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่หนึ่ง ความสว่างของแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่สองจะเปลี่ยนไป ความสว่างของแสงจะมากที่สุด เมื่อทิศของโพลาไรซ์ของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองอยู่ขนานกันและความสว่างจะน้อยที่สุด เมื่อทิศของโพลาไรซ์ของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองตั้งฉากกัน ดังรูป 2.6 (ข) (ถ้าแผ่นโพลาไรซ์มีคุณภาพดีมากจะไม่มีแสงผ่านออกมาเลย)



รูปที่ 2.6 ก) แสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ จะได้แสงแบบโพลาไรซ์
ข) แสงไม่โพลาไรซ์ไม่สามารถผ่านแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นที่มีทิศของโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน

2.3 ชนิดของแสงโพลาไรซ์

จากหลักการพื้นฐานของคลื่นแสงธรรมชาตินี้ จะพิจารณาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการโพลาไรซ์ของแสง ซึ่งในการจำแนกชนิดของโพลาไรซ์จะพิจารณาความสัมพันธ์ทางเฟส (Φ_0) ของทิศทาง x และ y และเปรียบเทียบขนาดระหว่าง E_x และ E_y ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของแสงโพลาไรซ์ได้ 3 แบบดังนี้ คือ แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น (Linearly Polarized Light) และแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม (Circularly Polarized Light) และแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี (Elliptically Polarized Light)

2.3.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น (Linearly Polarized Light)

ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นส่วนประกอบของของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากโพลาไรซ์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะคลื่นตามขวางเท่านั้น ดังนั้นจากการที่แสงเคลื่อนที่ตามแกน z จะสามารถแสดงแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีทิศทางตามแกน x ได้โดย

$$\vec{E}_x = E_{0x} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{i} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_{0x} คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า และ \hat{i} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน x และในทำนองเดียวกันแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศทางตามแกน y สามารถเขียนได้โดย

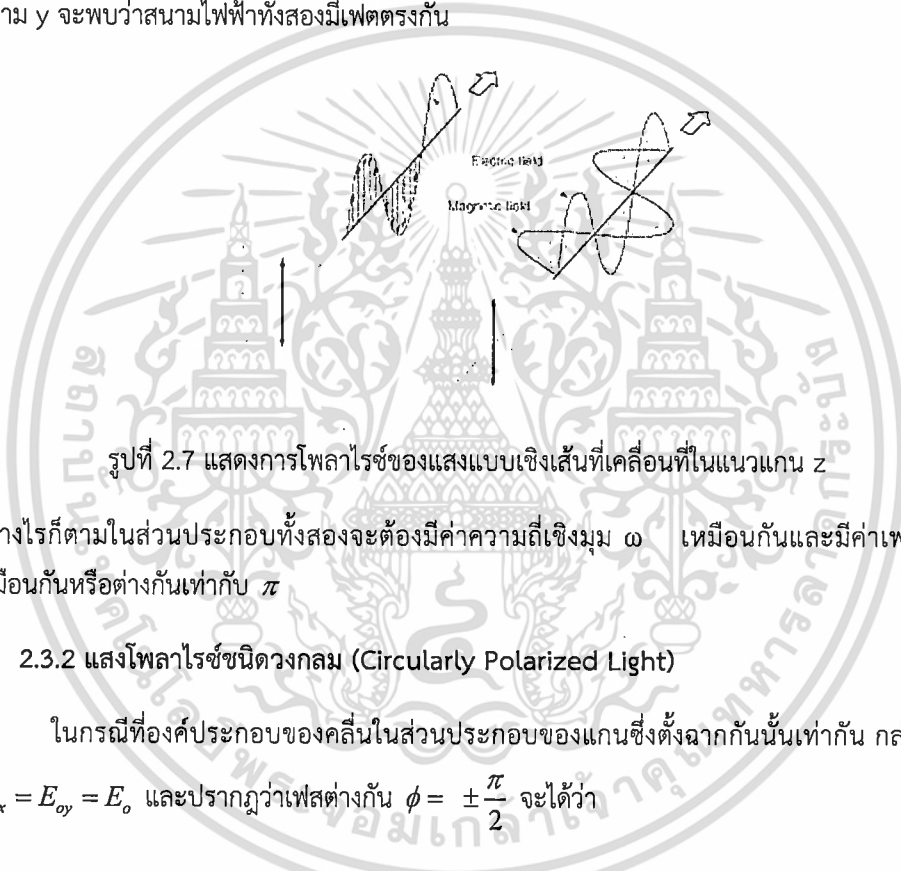
$$\vec{E}_y = E_{0y} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \hat{j} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

j คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน y สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นสามารถกระทำในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่และสามารถแสดงในรูปของผลรวมของเวกเตอร์ \vec{E}_x และ \vec{E}_y ได้เป็น

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y = \{E_{ox}\hat{i} + E_{oy}\hat{j}\} \sin[\omega t - kz + \phi_0] \quad (2.7)$$

แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งมีแกนโพลาไรเซชันทำมุมใดๆกับทิศทางในระนาบ xy สามารถแสดงได้โดยส่วนประกอบทั้งสองตามแกน x และ y ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงคลื่นแสงที่มีสนามไฟฟ้าในระนาบคงที่ เมื่อแยกสนามไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกัน เป็นสนาม x และสนาม y จะพบว่าสนามไฟฟ้าทั้งสองมีเฟตตรงกัน



รูปที่ 2.7 แสดงการโพลาไรซ์ของแสงแบบเชิงเส้นที่เคลื่อนที่ในแนวแกน z

อย่างไรก็ตามในส่วนประกอบทั้งสองจะต้องมีค่าความถี่เชิงมุม ω เหมือนกันและมีค่าเฟส Φ_0 เหมือนกันหรือต่างกันเท่ากับ π

2.3.2 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม (Circularly Polarized Light)

ในกรณีที่ต้องประกอบของคลื่นในส่วนประกอบของแกนซึ่งตั้งฉากกันนั้นเท่ากัน กล่าวคือ

$E_{ox} = E_{oy} = E_0$ และปรากฏว่าเฟสต่างกัน $\phi = \pm \frac{\pi}{2}$ จะได้ว่า

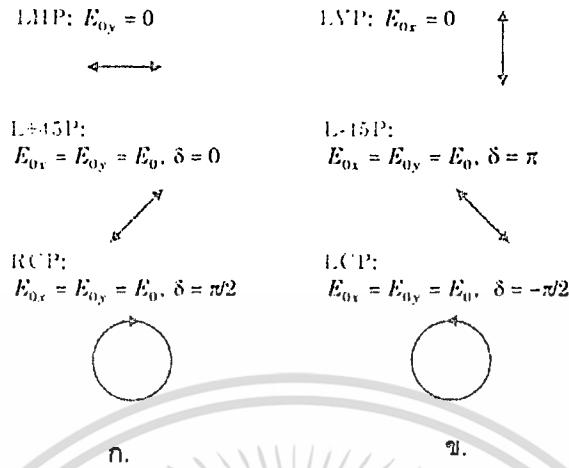
$$\vec{E}_x(z,t) = \hat{i}E_0 \cos(kz - \omega t) \quad (2.8)$$

และ

$$\vec{E}_y(z,t) = \hat{j}E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (2.9)$$

ซึ่งมีสมการสรุปรวมเป็นดังนี้

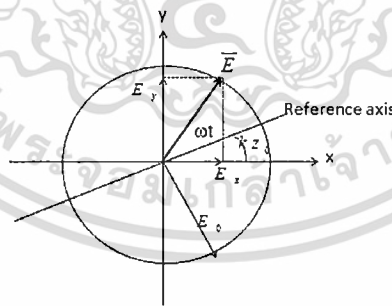
$$\vec{E} = E_0[\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.8 ก) แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา หรือตามเข็มนาฬิกา
 ข) แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้าย หรือทวนเข็มนาฬิกา

แอมพลิจูดของแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม สนามไฟฟ้า E คือ $(\vec{E} \cdot \vec{E})^{1/2} = E_0$ เป็นค่าคงที่ แต่ทิศของ \vec{E} เปลี่ยนไปตามเวลาโดยไม่มีอยู่ในระนาบใดระนาบหนึ่งตั้งในกรณีของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใดๆ z_0 บนแกน เมื่อ $t=0$ \vec{E} จะอยู่บนแกนที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นแกนอ้างอิง (Reference) ดังนั้น

$$\vec{E}_x = \hat{i}E_0 \cos(kz_0) \text{ และ } \vec{E}_y = jE_0 \sin(kz_0) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.9 แสดงการหมุนของเวกเตอร์ไฟฟ้าในกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา

เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่ง $t = kz_0/\omega$ จะได้ว่า $\vec{E}_x = \hat{i}E_0, \vec{E}_y = 0$ และ \vec{E} อยู่ในแกน x คลื่นรวม \vec{E} จึงหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความถี่เชิงมุม ω โดยมีทิศสวนทางกับทิศการเคลื่อนที่ของแสงตรงไปยังตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งกำเนิดแสง หรืออาจจะกล่าวได้ว่า \vec{E}_y นำ \vec{E}_x อยู่ $\pi/2$ เรเดียน ซึ่งหมายความว่า \vec{E}_y จะมีค่าสูงสุดก่อนที่ \vec{E}_x จะมีค่าสูงสุดล่วงหน้าไปก่อนถึง 1 ใน 4 ของ

แต่ละรอบ จึงเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าหมุนเป็นวงกลมตามเข็มนาฬิกา และเวกเตอร์ \vec{E} จะหมุนไปครบรอบ โดยแสงจะพุ่งไปข้างหน้าเท่ากับความเร็วหนึ่งช่วงคลื่น เรียกแสงที่มีสถานะการโพลาไรเซชันลักษณะนี้ว่าแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา (Right Circularly Polarization : RCP) โดยมีเฟส $\Phi = +\pi/2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก)

ในกรณีที่ตรงกันข้าม $\Phi = -\pi/2$ จะได้ว่า

$$\vec{E} = E_0[i \cos(kz - \omega t) - j \sin(kz - \omega t)] \quad (2.12)$$

จะเห็นว่าแอมพลิจูดไม่ได้ต่างไปจากกรณีข้างต้น แต่ \vec{E} จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาจึงเรียกว่าเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้าย (Left Circularly Polarization : LCP) ซึ่ง \vec{E}_y จะตามหลัง \vec{E}_x ไปเป็น 1 ใน 4 ของแต่ละรอบ ทำให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) พิจารณาโดยทั่วไปจะพบว่าสภาวะโพลาไรเซชันชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้จะเป็นไปได้เมื่อเฟส Φ มีค่าต่างๆ กันตามลำดับต่อไปนี้

เมื่อ $\phi = +\frac{\pi}{2} + 2m\pi$ โดยที่ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ คือชนิดวงกลมตามขวา

เมื่อ $\phi = -\frac{\pi}{2} + 2m\pi$ โดยที่ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ คือชนิดวงกลมตามซ้าย

ถ้านำแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้ซึ่งมีแอมพลิจูดเท่ากันมารวมกันก็จะกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นไป ตัวอย่างเช่น คลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวาในสมการ (2.11) และคลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้ายในสมการ (2.12) เมื่อนำมารวมกันจะได้สมการของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ดังนี้

$$\vec{E} = 2E_0 i \cos(kz - \omega t) \quad (2.13)$$

ซึ่งจะเห็นว่าคลื่นนี้มีแอมพลิจูดคงที่ และมีรูปแบบเป็นไปตามลักษณะของโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น

2.3.3 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี (Elliptically Polarized Light)

จากการพิจารณาที่ผ่านมารวมกันในส่วนประกอบของแสงโพลาไรซ์ที่มีส่วนประกอบของเฟสเหมือนกันหรือต่างกัน π นั้นแสงโพลาไรซ์จะเป็นชนิดเชิงเส้น ในกรณีที่เฟสต่างกัน $\frac{\pi}{2}$ หรือ $-\frac{\pi}{2}$ และมีแอมพลิจูดเท่ากันจะเป็นส่วนประกอบของโพลาไรซ์วงกลม แต่ถ้าส่วนประกอบในการรวมกันนั้นทำให้ไม่เท่ากันจะเป็นกรณีของโพลาไรซ์แบบวงรี

$$\vec{E}_x = E_{ox} \cos(kz - \omega t) i \quad (2.14)$$

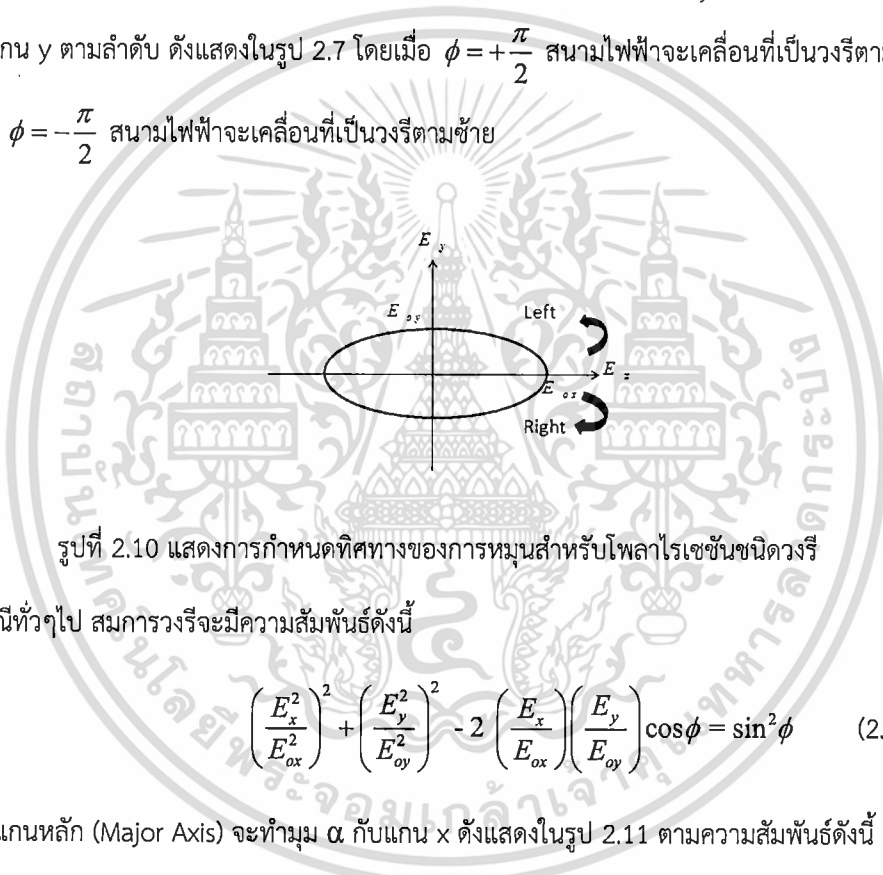
และ

$$\overline{E}_y = E_{oy} \sin(kz - \omega t + \phi)j \quad (2.15)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} = \cos^2(kz - \omega t) + \cos^2(kz - \omega t + \phi) = 1 \quad (2.16)$$

จะเห็นว่าความสัมพันธ์นี้คือสมการวงรีที่มีแกนหลักเป็น $2E_{ox}$ และ $2E_{oy}$ ตามแนวแกน x กับแนวแกน y ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 2.7 โดยเมื่อ $\phi = +\frac{\pi}{2}$ สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงรีตามขวา แต่ถ้า $\phi = -\frac{\pi}{2}$ สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงรีตามซ้าย



รูปที่ 2.10 แสดงการกำหนดทิศทางของการหมุนสำหรับโพลารไรเซชันชนิดวงรี

ในกรณีทั่วไป สมการวงรีจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)\cos\phi = \sin^2\phi \quad (2.17)$$

โดยที่แกนหลัก (Major Axis) จะทำมุม α กับแกน x ดังแสดงในรูป 2.11 ตามความสัมพันธ์ดังนี้

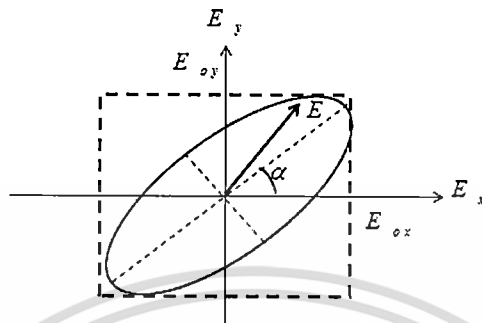
$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{ox}E_{oy}\cos\phi}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2} \quad (2.18)$$

ซึ่งแกนหลักจะเป็นแกนเดียวกับแกน x โดยที่ $\alpha = 0$ เมื่อเฟสสัมพันธ์มีค่าดังนี้

$$\phi = \pm\frac{\pi}{2}, \pm\frac{3\pi}{2}, \pm\frac{5\pi}{2}, \dots \quad (2.19)$$

และจะได้ว่า

$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} = 1 \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะทั่วไปของคลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงรี

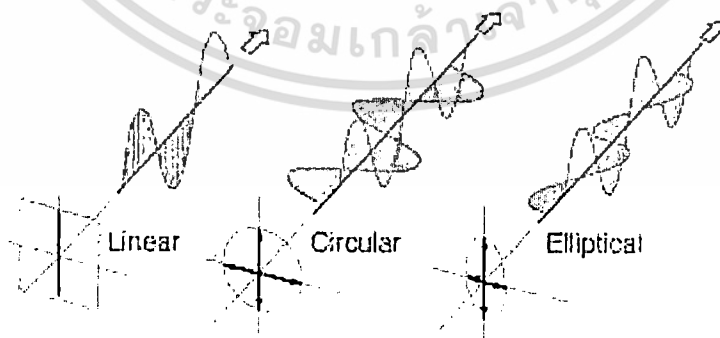
ซึ่งจะเห็นว่าตรงกับที่พิจารณาแล้วในความสัมพันธ์ ตามสมการ (2.16)

ในกรณีที่ $E_{ox} = E_{oy}$ จะได้ว่า $E_x^2 + E_y^2 = A_x^2$ เป็นความสัมพันธ์ในรูปแบบของโพลาไรเซชันชนิดวงกลมนั่นเอง และถ้าเฟสสัมพันธ์ ϕ มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ π จะได้ว่าสมการ (2.17) จะกลายเป็น

$$E_y = \pm \frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x \quad (2.21)$$

ซึ่งนับว่าอยู่ในรูปแบบของโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นที่มีความชันเป็น $\pm E_{oy} / E_{ox}$

ในรูปที่ 2.12 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น การโพลาไรเซชันแบบวงกลม และโพลาไรเซชันแบบวงรี ตามลำดับ



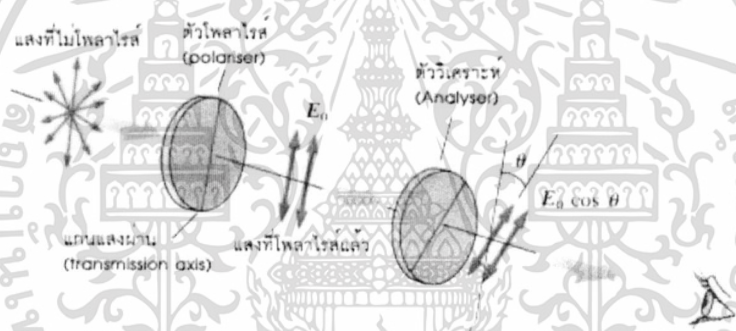
รูปที่ 2.12 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น การโพลาไรซ์แบบวงกลม และการโพลาไรซ์แบบวงรี ตามลำดับ

2.4 การทำให้คลื่นแสงไม่โพลาไรซ์เป็นคลื่นแสงโพลาไรซ์

เราสามารถทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงแบบโพลาไรซ์ได้ด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้ การเลือกดูดกลืนคลื่น (Selective Absorption) การสะท้อน (Reflection) การหักเหซ้อน (Double Refraction) และการกระเจิง (Scattering) ซึ่งจะทำให้การอธิบายกระบวนการทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงแบบโพลาไรซ์ ตามลำดับ

2.4.1 โพลาริเซชันโดยการเลือกดูดกลืน (Selective Absorption)

เมื่อให้แสงไม่โพลาไรซ์ผ่านแผ่นโพลารอยด์ สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์ที่มีทิศตั้งฉากกับแกนโพลาไรเซชันของแผ่นโพลารอยด์จะถูกดูดกลืนไปในแผ่นโพลารอยด์ ส่วนสนามไฟฟ้าที่มีทิศขนานกับแกนโพลาไรเซชันของแผ่นโพลารอยด์จะผ่านแผ่นโพลารอยด์ออกมาได้ และมีสนามไฟฟ้าในทิศเดียวกับแกนโพลาไรเซชันของแผ่นโพลารอยด์ ดังรูปที่ 2.13 เราเรียกแผ่นโพลารอยด์ที่ทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์นี้ว่า แผ่นสร้างแสงโพลาไรซ์ หรือแผ่นโพลาไรเซอร์ (polarizer)



รูปที่ 2.13 โพลาริเซชันโดยการเลือกดูดกลืนด้วยแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่น

การใช้แผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นเรียกว่า Polarizer และ Analyzer ตามลำดับการวาง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จึงสามารถลดความเข้มของแสงเป็นค่าต่างๆ ได้ดังนี้

เมื่อแสงผ่านแผ่น Polarizer (แผ่นแรก) คลื่นแสงจะมีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า E_1 สันในทิศทางเดียว เมื่อแสงผ่านแผ่นที่สอง Analyzer ที่มีสมบัติเหมือนกันแต่บิดแนวแกนเป็นมุม θ เทียบกับตัวแรก คลื่นแสงผ่านตัวที่สองจะมีค่าสนามไฟฟ้าลดลงเป็น E_2 ที่มีค่า

$$E_2 = E_1 \cos \theta \quad (2.22)$$

จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าความเข้มแสง (I) แปรผันตามค่าสนามไฟฟ้า ยกกำลังสองดังนั้น

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta \quad (2.23)$$

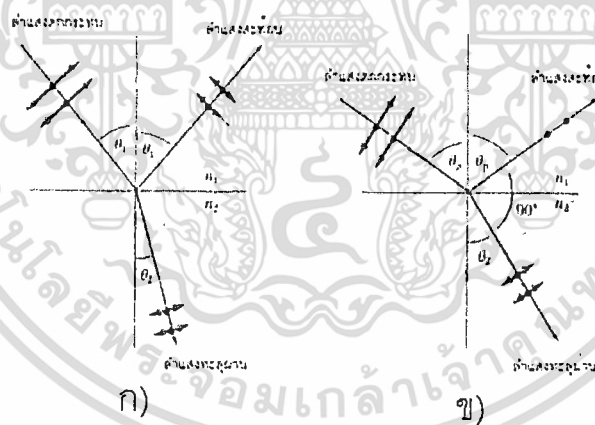
เรียกว่า Malus's Law ใช้กับแสงที่โพลาไรซ์เชิงเส้น (หรือเชิงระนาบ) เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 โพลาริเซชันโดยการสะท้อน (Reflection by Polarization)

เมื่อให้แสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนผิวของตัวกลางหักเหที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ n เช่น กระจก กระเบื้อง หรือน้ำ เราสามารถพิจารณาสนามไฟฟ้าในทิศใด ๆ ของแสงไม่โพลาไรซ์เป็น 2 องค์ประกอบ คือ องค์ประกอบในระนาบรังสีตกกระทบบ (ระนาบที่ผ่านรังสีตกกระทบบและเส้นปกติ) และองค์ประกอบในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบรังสีตกกระทบบ แสงที่มีสนามไฟฟ้าในแต่ละองค์ประกอบนี้จะสะท้อนได้ดีไม่เท่ากัน โดยแสงที่มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับระนาบรังสีตกกระทบบจะสะท้อนได้ดีกว่า แสงสะท้อนจึงมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าส่วนที่ตั้งฉากกับระนาบรังสีตกกระทบบมากกว่าส่วนที่อยู่ในระนาบรังสีตกกระทบบ ทำให้มีลักษณะเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วน (Partially Polarized Light)

ถ้าเราเปลี่ยนมุมที่แสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนผิวของตัวกลางหักเหไปเรื่อย ๆ จะมีมุมตกกระทบบค่าหนึ่งที่ทำให้แสงสะท้อนมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบรังสีตกกระทบบเท่านั้น แสงสะท้อนจึงเป็นแสงโพลาไรซ์แบบเส้นตรงโดยสมบูรณ์ เราเรียกมุมตกกระทบบค่านี้ (θ_p) ว่ามุมโพลาไรซ์ (Polarizing angle) หรือ มุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle) นอกจากนี้ยังพบว่าที่มุมบริวสเตอร์นี้ รังสี สะท้อนและรังสีหักเหจะตั้งฉากกัน และแสงหักเหจะเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วน



ก) กรณีทั่วไป ข) กรณีที่สะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์

รูปที่ 2.14 การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงแบบโพลาไรซ์โดยการสะท้อน

เมื่อแสงที่ไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง n_1 และ n_2 ดังรูปที่ 2.14 แสงที่สะท้อนจะเป็นแสงที่โพลาไรซ์ได้ เมื่อมุมระหว่างรังสีสะท้อนกับรังสีหักเหเป็นมุมฉาก

$$\theta_p + 90^\circ + \theta_t = 180^\circ \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p \quad (2.25)$$

โดยที่ θ_p คือ มุมโพลาไรซ์ (Polarizing angle) เป็นมุมตกกระทบ ซึ่งเท่ากับมุมสะท้อน ที่ทำให้เกิดการสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์ทั้งหมด และ θ_2 คือมุมหักเห ใช้กฎของสเนลล์ (Snell's law)

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.26)$$

แทนค่า n_1 เท่ากับ 1 (อากาศ) และ n_2 เท่ากับ n (วัสดุใดๆ)

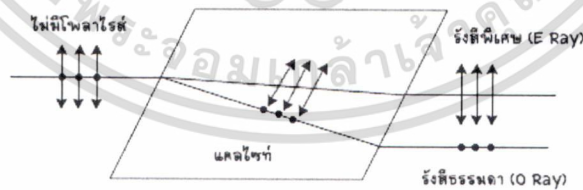
$$\sin \theta_p = n \sin(90^\circ - \theta_p) = n \cos \theta_p \quad (2.27)$$

$$n = \tan \theta_p \quad (2.28)$$

เรียกว่า Brewster's law สามารถใช้หาค่าดัชนีหักเหของวัสดุ โดยการวัดค่ามุมโพลาไรซ์ค่าเดียวเท่านั้น

2.4.3 โพลาริเซชันโดยการหักเหซ้อน (Double Refraction)

เมื่อแสงผ่านเข้าไปในแก้ว แสงจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันทุกทิศทาง เพราะแก้วมีดรรชนีหักเหเพียงค่าเดียว แต่เมื่อแสงผ่านเข้าไปในผลึกแคลไซต์หรือควอตซ์ แสงจะมีอัตราเร็วไม่เท่ากันทุกทิศทาง ด้วยเหตุนี้เองแสงที่ผ่านแคลไซต์จึงสามารถหักเหออกเป็น 2 แนว (Double diffraction หรือ Birefringence) ดังรูปที่ 2.15 รังสีหักเหทั้งสองแนวเป็นแสงโพลาไรซ์ โดยมีสนามไฟฟ้าของรังสีหักเหแต่ละรังสีตั้งฉากกัน ซึ่งแสดงด้วยลูกศรและจุด รังสีที่แทนด้วยจุด เรียกว่า รังสีธรรมดา (Ordinary ray) มีอัตราเร็วเท่ากันทุกทิศทาง รังสีที่แทนด้วยลูกศร เรียกว่า รังสีพิเศษ (Extraordinary ray) มีอัตราเร็วในผลึกต่างกันในทุกทิศทาง

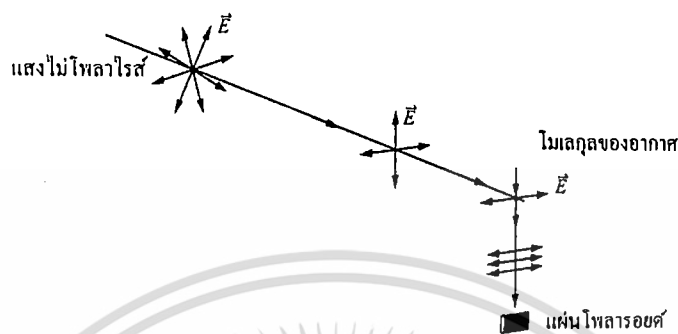


รูปที่ 2.15 แสงโพลาไรซ์โดยการหักเหสองแนว

2.3.4 โพลาริเซชันโดยการกระเจิง (Scattering Polarization)

เมื่อแบบไม่โพลาไรซ์ เช่น แสงจากดวงอาทิตย์ ผ่านเข้ามาในบรรยากาศ แสงจะกระทบกับโมเลกุลของอากาศหรืออนุภาคในบรรยากาศ อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะดูดกลืนแสงที่ตกกระทบนั้น

และจะปลดปล่อยแสงนั้นออกมาอีกครั้งหนึ่งในทุกทิศทาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกระเจิงของแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสงโพลาไรซ์จากการกระเจิงของแสง

แสงจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบโมเลกุลของอากาศ สนามไฟฟ้าของแสง จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่ คล้ายกับการเคลื่อนที่กลับไปมาของประจุไฟฟ้าในสายอากาศ แต่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ซับซ้อนกว่า อาจถือได้ว่าแสงอาทิตย์มีแนวของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งและแนวระดับตั้งรูป เมื่อแสงที่มีสนามไฟฟ้าในแนวระดับกระทบโมเลกุลของอากาศ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปมาในแนวระดับ และในขณะเดียวกันสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่ไปมาในแนวตั้ง อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในแนวระดับจะให้แสงโพลาไรซ์ในแนวระดับ ดังรูปที่ 2.16 ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งจะให้แสงโพลาไรซ์ในแนวตั้ง (ไม่ได้แสดงในรูป) เราสามารถตรวจสอบแสงโพลาไรซ์นี้ได้ โดยให้ผู้สังเกตมองท้องฟ้าผ่านแผ่นโพลาไรซ์ แล้วหมุนแผ่นโพลาไรซ์ไปรอบๆ จะพบว่าความสว่างของแสงเปลี่ยนไป แสดงว่าแสงจากท้องฟ้าส่วนหนึ่ง มีแสงโพลาไรซ์ปนอยู่ด้วย

ในการทดลองของงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้การสร้างแสงโพลาไรซ์ด้วยการสะท้อน (Reflection Polarization) เมื่อแสงตกกระทบทำมุม θ_p กับผิวรอยต่อของตัวกลางสองชนิดจะทำให้มุมของรังสีสะท้อน (Reflected Ray) ตั้งฉาก (90 องศา) กับรังสีหักเห (Refracted Ray) ซึ่งเรียกว่า มุมโพลาไรซ์ (Polarizing angle) หรือมุมบรูว์สเตอร์ (Brewster's angle) ซึ่งเป็นวิธีสร้างแสงโพลาไรซ์ที่ง่ายที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยเพื่อสร้างต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้เพื่อแยกสายพันธุ์ข้าวชนิดต่างๆ จะทำการอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง อุปกรณ์การทดลอง การจัดอุปกรณ์การทดลอง และขั้นตอนการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

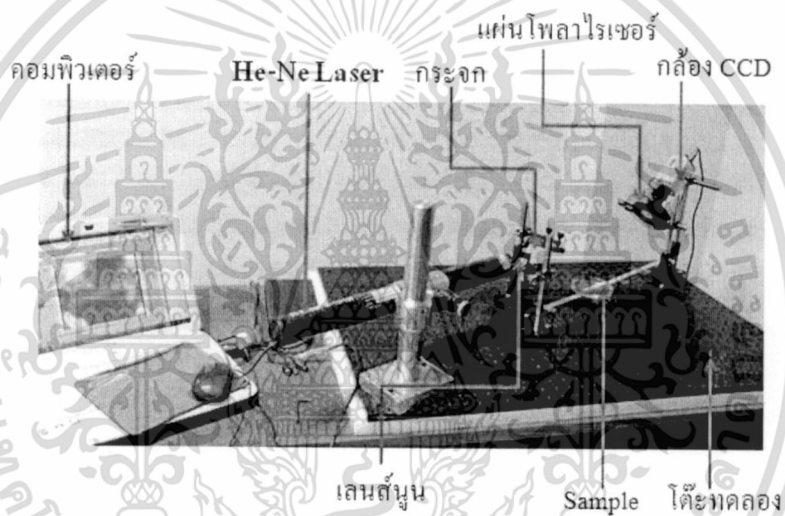
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อสร้างต้นแบบระบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงที่มีความละเอียดสูง เพื่อได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง และจำเป็นต้องทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีมืด หรือมีแสงสว่างจากภายนอกบริเวณน้อย ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบกล้องถ่ายภาพประกอบด้วย

1. เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร กำลังแสง 12 มิลลิวัตต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงสีแดง
2. เลนส์นูน (Convex lens) ความยาวโฟกัส 35 มิลลิเมตร ขยายลำแสงเลเซอร์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อสามารถสังเกตการโพลาไรซ์ของแสงจากสารตัวอย่างได้ชัดเจน
3. กระจกสะท้อนแสง (Mirror) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ทำหน้าที่สะท้อนลำแสงที่ถูกขยายจากเลนส์นูนให้ตกกระทบบนสารตัวอย่างที่มุมตกกระทบ Brewster พอดี
4. กล้องถ่ายภาพ CCD ใช้บันทึกภาพลำแสงสะท้อนที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ และนำไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์
5. แผ่นโพลาไรเซอร์ 1 แผ่นที่สามารถปรับมุมการโพลาไรซ์ของแสงได้ เพื่อสามารถปรับความเข้มแสง หรือความสว่างของแสงโพลาไรซ์ที่สะท้อนจากสารตัวอย่าง ตามความต้องการ ที่มุมโพลาไรซ์ต่างๆ
6. คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่เก็บภาพที่ถูกถ่ายจากกล้อง CCD เพื่อแสดงผลการโพลาไรซ์ของสารตัวอย่าง
7. โต๊ะทดลอง ทำหน้าที่วางอุปกรณ์ที่ชะในการทดลอง จำเป็นต้องใช้โต๊ะที่ลดการสั่นสะเทือนจากภายนอก
8. ตัวอย่างพันธุ์ข้าว 5 สายพันธุ์ คือ ชัยนาท, ขาวดอกมะลิ 105, ปทุมธานี 1, สุพรรณบุรี 60 และ กข. (กรมการข้าว) 23
9. แท่นยึดอุปกรณ์การทดลอง 5 ตัวตัว ได้แก่ ยึดเลเซอร์ กระจก เลนส์ แผ่นโพลาไรเซอร์ และกล้อง CCD
10. อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ปีกเกอร์ ใช้ดวงสารละลาย, ถาดใส่สารตัวอย่าง และชุดหกลieß เป็นต้น

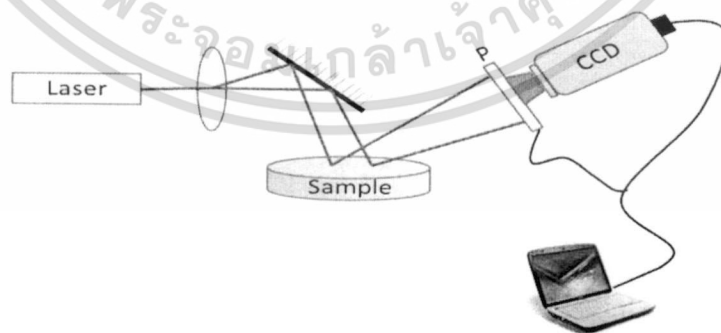
3.2 การจัดระบบการทดลอง

การจัดชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงในรูปที่ 3.1 และแผนภาพการจัดอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งลำแสงจากเลเซอร์ (Light source) ตกกระทบบนเลนส์นูน ถูกขยายออกเป็นลำแสงที่มีเส้นผ่าน

ศูนย์กลางมากขึ้น จากนั้นลำแสงตกกระทบบนกระจก และสะท้อนจากกระจกไปตกกระทบกับสารตัวอย่าง (พันธู์ข้าว) ในน้ำ เมื่อลำแสงตกกระทบบนสารตัวอย่างด้วยมุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle) จะทำให้เกิดแสง 2 ลำ โดยลำที่ 1 หักเหผ่านสารตัวอย่างที่อยู่ในน้ำ ส่วนลำที่ 2 จะสะท้อนที่ผิวสารตัวอย่างขึ้นไปในอากาศ ซึ่งลำแสงทั้ง 2 ลำจะทำมุมตั้งฉากกัน (90 องศา) สามารถสังเกตว่าถ้ามุมตกกระทบของลำแสงเป็นมุมบริวสเตอร์ โดยการสังเกตจากลำแสงสะท้อน (ลำที่ 2) ที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ ถ้าสังเกตเห็นลำแสงมีความเข้มน้อยมาก หรือไม่มีเลย ที่มุมโพลาไรซ์ 0 องศา และที่มุมโพลาไรซ์ 90 องศา สังเกตลำแสงได้ชัดเจน หรือเข้มที่สุด แสดงว่าเป็นมุมบริวสเตอร์ที่ถูกต้อง แต่ถ้ากรณีตรงข้ามไม่สามารถสังเกตลำแสงโพลาไรซ์ได้อย่างชัดเจน ส่วนแสงลำที่ 1 (ลำแสงหักเห) เราไม่เราใจในการทดลองนี้ และในการทดลองทิศของลำแสงโพลาไรซ์จากแสงสะท้อน ถูกติดตั้งให้อยู่ในแนวระนาบกับโต๊ะทดลองเพื่อความสะดวกในการปรับมุมโพลาไรซ์ของแสง



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อสร้างต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่ปรับโพลาไรซ์ได้



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูป 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการและขั้นตอนการดำเนินงาน

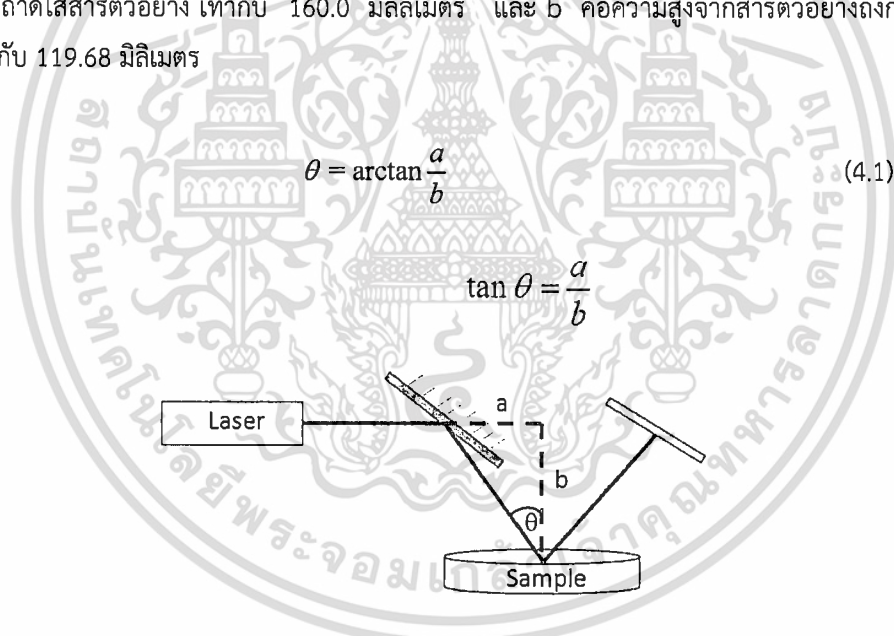
1. วางแผนการทำงานและระยะเวลาและการทดลองพร้อมทั้งวางตารางการทำงานของแต่ละช่วงการทดลองทั้งหมดก่อนการทดลอง
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบการสร้างต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้ พร้อมทั้งศึกษาการสร้างโพลาไรซ์ของแสงโดยการสะท้อนที่มุมตกกระทบบริวสเตอร์ และศึกษาพันธุ์ข้าวที่นำมาใช้ในการทดลอง
3. ออกแบบระบบการสร้างต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับกล้องโพลาไรซ์ได้ โดยการสร้างลำแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน ซึ่งในการทดลองใช้กระจกช่วยในการสะท้อนของแสงโพลาไรซ์
4. เริ่มทำการจัดอุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการทางแสง และจัดวางอุปกรณ์ลงบนโต๊ะทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และแผนภาพการจัดอุปกรณ์ในรูปที่ 3.2
5. เมื่อทำการจัดอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นเปิดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และหาค่ามุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle) โดยปรับกระจกให้แสงสะท้อนลงบนสารตัวอย่าง (sample) ที่เป็นน้ำ แล้วสังเกตแสงโพลาไรซ์ที่สะท้อนจากน้ำ ผ่านไปยังแผ่นโพลาไรเซอร์ที่ปรับมุมโพลาไรซ์เป็น 0 องศา จะต้องมองไม่เห็นลำแสง และเมื่อปรับมุมโพลาไรเซอร์เป็น 90 องศา จะต้องเห็นความเข้มแสงมากที่สุด ถ้ามุมตกกระทบยังไม่ถูกต้องให้ปรับกระจกเพื่อให้ลำแสงตกกระทบที่มุมบริวสเตอร์
6. สารตัวอย่าง (น้ำ) วางห่างจากกระจก 16 เซนติเมตร จากนั้นบันทึกภาพแสงโพลาไรซ์ที่สะท้อนจากตัวอย่างด้วยกล้อง CCD ด้วยมุมโพลาไรซ์ $0^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}, 90^{\circ}$ เก็บไว้ในคอมพิวเตอร์
7. ใช้ข้าวพันธุ์ชัยนาท 10 กรัม ตำจนละเอียดละลายในน้ำ 20 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางเป็นสารตัวอย่างแทนน้ำในข้อ 6 แล้วถ่ายภาพแสงโพลาไรซ์ที่สะท้อนผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม $0^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}, 90^{\circ}$ ด้วยกล้อง CCD เก็บไว้ในคอมพิวเตอร์
8. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 6-7 โดยเปลี่ยนตัวอย่างเป็นพันธุ์ข้าวที่เหลืออีก 4 ชนิด คือ สุพรรณ 60, ปทุมธานี 1, ขาวดอกมะลิ 105 และ กข.(กรมการข้าว) 23
9. ข้อควรระวังในการทดลองคือ สัดส่วนของสารตัวอย่างแต่ละชนิดที่ละลายในน้ำต้องเท่ากัน และกระจก กับเลนส์นูนต้องไม่มีรอยนิ้วมือ มิฉะนั้นจะทำให้เห็นภาพการโพลาไรซ์ของสารตัวอย่างไม่ชัดเจน เนื่องจากอาจมีรอยนิ้วมืออยู่ในภาพด้วย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 มุมบรีวส์เตอร์ของน้ำ

ในการทดลองเพื่อสร้างต้นแบบกล้องถ่ายภาพที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้นั้น จะใช้วิธีสร้างแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน ซึ่งเป็นวิธีสร้างแสงโพลาไรซ์ที่ง่ายที่สุด จากการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณหามุมบรีวส์เตอร์ (θ) ของน้ำ ซึ่งเป็นมุมตกกระทบของลำแสงที่ทำให้ลำแสงหักเหและลำแสงสะท้อนทำมุมฉากกัน หรือทำมุม 90 องศา และอีกวิธีหนึ่งที่สามารถสังเกตได้ว่ามุมตกกระทบเป็นมุมบรีวส์เตอร์คือ ลำแสงโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนจะมีแนวโพลาไรซ์เพียงแนวเดียวเท่านั้น ซึ่งในการทดลองอยู่ในแนวขนานกับพื้นโต๊ะ ในการทดลองเราใช้ความสัมพันธ์ของตรีโกณมิติ ดังรูปที่ 4.1 และคำนวณค่ามุมได้จากสมการที่ (4.1) เมื่อ a คือระยะจากกระจกสะท้อนถึงตำแหน่งกึ่งกลางของถาดใส่สารตัวอย่าง เท่ากับ 160.0 มิลลิเมตร และ b คือความสูงจากสารตัวอย่างถึงกระจก เท่ากับ 119.68 มิลลิเมตร

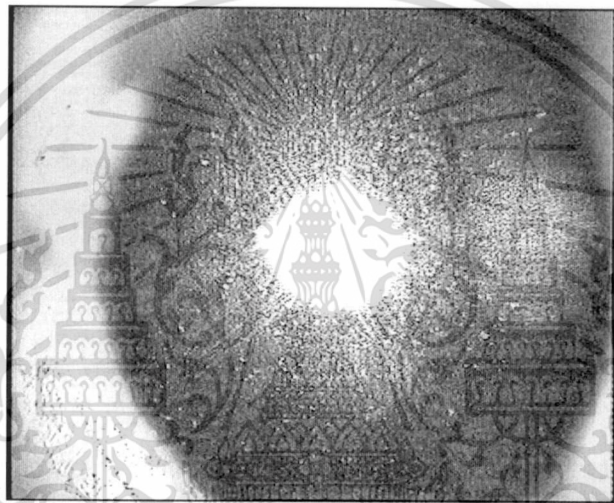


รูปที่ 4.1 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อคำนวณหามุมบรีวส์เตอร์

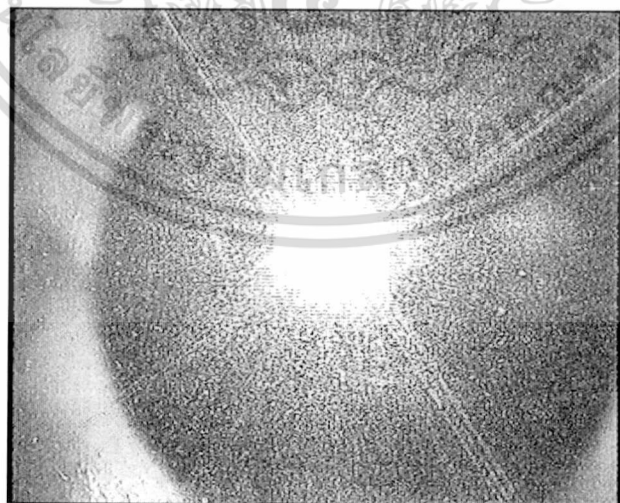
จากการคำนวณโดยใช้สมการตรีโกณมิติ เมื่อแทนค่า a และ b ลงในสมการ (4.1) สามารถคำนวณหาค่ามุมตกกระทบของลำแสง ซึ่งเป็นมุมบรีวส์เตอร์ของน้ำ (θ) มีค่าเท่ากับ 53.2° และในการทดลองจะใช้มุมตกกระทบบรีวส์เตอร์ค่านี้ในการสังเกตแสงโพลาไรซ์ของสารตัวอย่างของพันธุ์ข้าวชนิดต่างๆ ที่สะท้อนผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุมโพลาไรซ์ค่าต่างๆ

4.2 แสงสะท้อนจากน้ำที่มุมบรีวส์เตอร์

ภาพถ่ายจากการปรับแผ่นโพลาไรซ์ที่บิดทำมุม 90, 75, 60, 45, 30, 15, และ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าที่มุมโพลาไรซ์ 90 องศา จะมีแสงสว่างน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะแสงสะท้อนที่มุมบรีวส์เตอร์มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแผ่นโพลาไรเซอร์นั่นเอง เมื่อทำการลดมุมของแผ่นโพลาไรซ์พบว่าแสงที่ผ่านออกมาจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น แต่ภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง CCTV กลับมีความสว่างลดลง ทั้งนี้เพราะความเข้มของแสงที่มากขึ้นจะทำให้กล้องลดความสว่างของภาพโดยรวมลง เพื่อให้ภาพที่ออกมาสมดุลง อย่างไรก็ตามแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่สว่างขึ้น จะพบการกระเจิงที่มากขึ้นตามไปด้วย

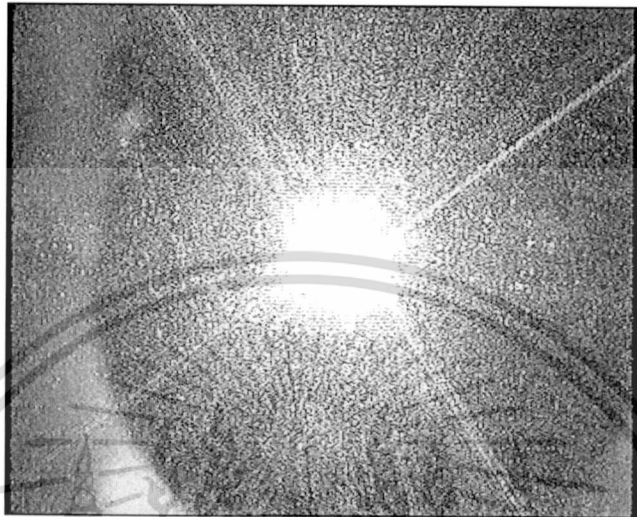


รูปที่ 4.2 แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 90 องศา

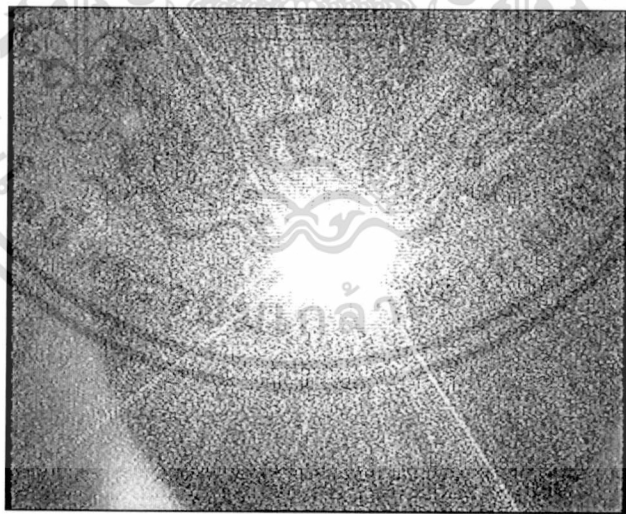


รูปที่ 4.3 แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

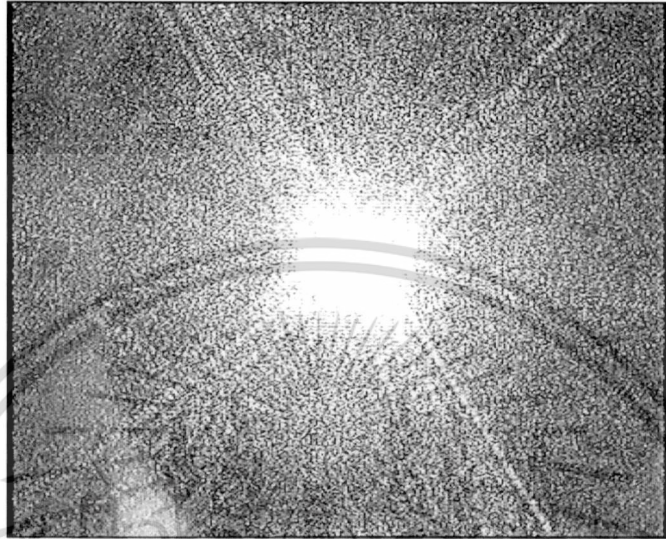


รูปที่ 4.4 แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 60 องศา

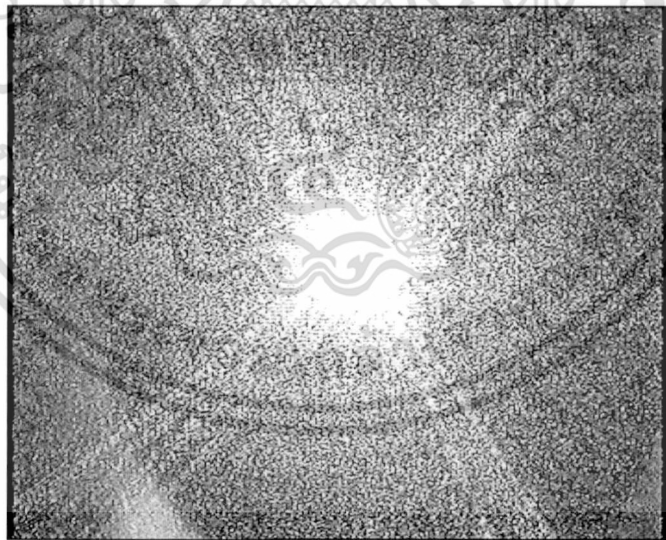


รูปที่ 4.5 แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

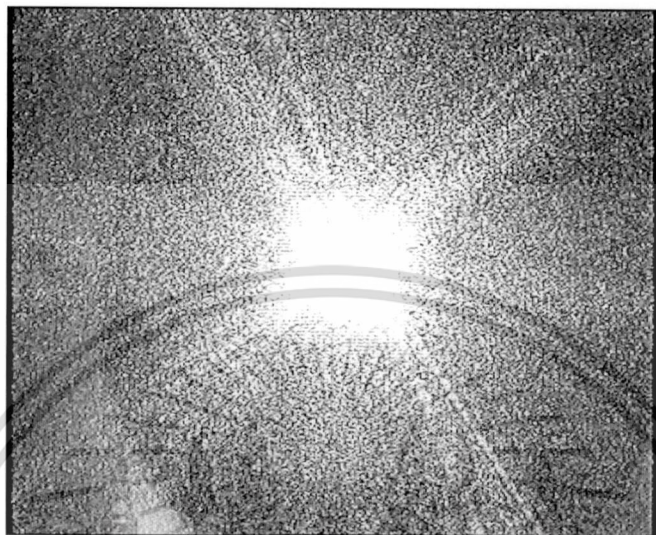


รูปที่ 4.6 แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มุม 30 องศา



รูปที่ 4.7 แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มุม 15 องศา

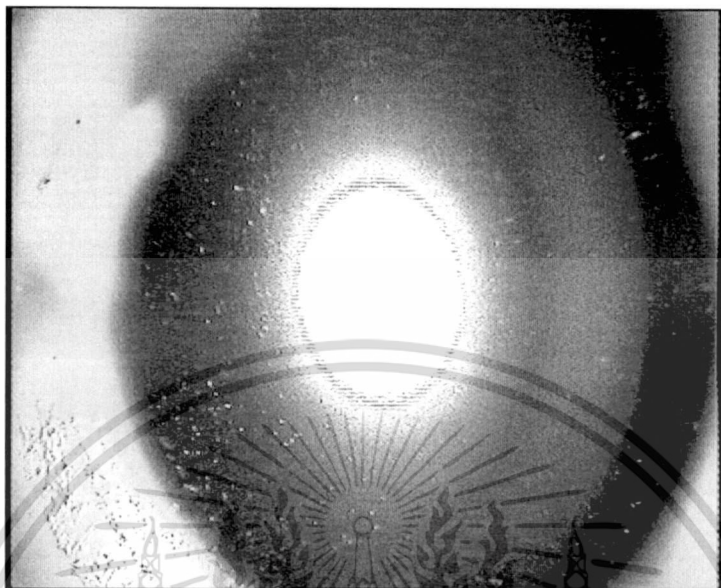
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสงสะท้อนจากน้ำที่ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 0 องศา

4.3 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ที่มุมบริวิสเตอร์

ภาพถ่ายจากการปรับแผ่นโพลาริเซออร์ที่บิดทำมุม 90, 75, 60, 45, 30, 15, และ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, และ 4.15 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าที่มุมโพลาริซ์ 90 องศา จะมีแสงสว่างน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะแสงสะท้อนที่มุมบริวิสเตอร์มีโพลาริซ์ตั้งฉากกับแผ่นโพลาริเซออร์นั่นเอง เมื่อทำการลดมุมของแผ่นโพลาริเซออร์พบว่าแสงที่ผ่านออกมาจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น แต่ภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง CCTV กลับมีความสว่างลดลง ซึ่งคล้ายกับภาพถ่ายการสะท้อนจากน้ำ แต่แตกต่างที่ภาพถ่ายการสะท้อนของน้ำข้าวจะมีการกระเจิงมากกว่า

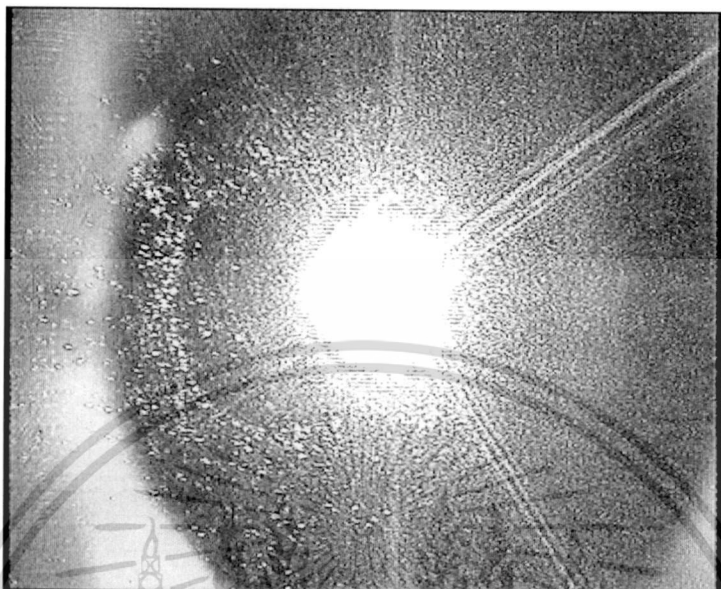


รูปที่ 4.9 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 90 องศา



รูปที่ 4.10 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

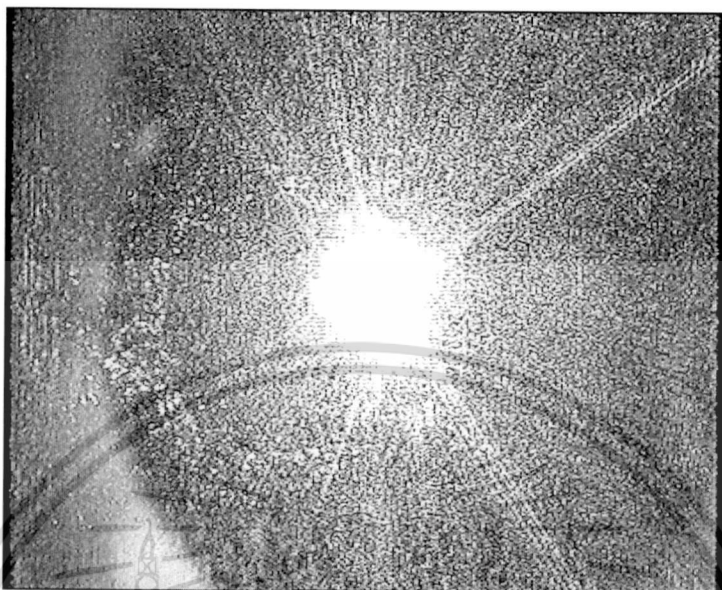


รูปที่ 4.11 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่มุ่ม 60 องศา



รูปที่ 4.12 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ชัยนาท ผ่านแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่มุ่ม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

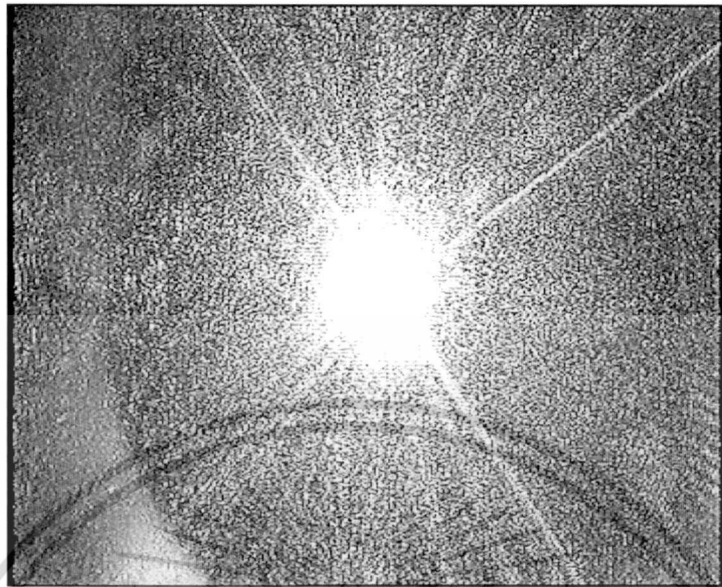


รูปที่ 4.13 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุชัยนาท ผ่านแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่มม 30 องศา



รูปที่ 4.14 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุชัยนาท ผ่านแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่มม 15 องศา

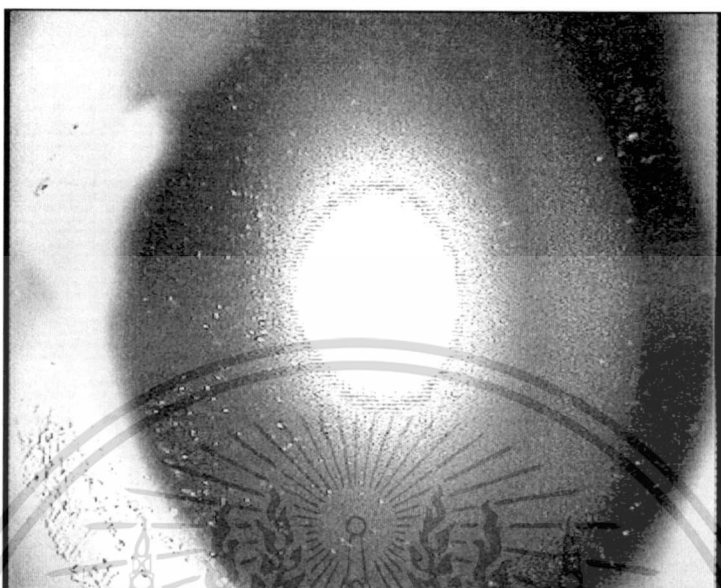
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุชยันนาท ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 0 องศา

4.4 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุขาวดอกมะลิ 105 ที่มุมบริวิสเตอร์

ภาพถ่ายจากการปรับแผ่นโพลาริเซอร์ที่บิดทำมุม 90, 75, 60, 45, 30, 15, และ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, และ 4.22 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าที่มุมโพลาริซ์ 90 องศา จะมีแสงสว่างน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะแสงสะท้อนที่มุมบริวิสเตอร์มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแผ่นโพลาริเซอร์นั่นเอง เมื่อทำการลดมุมของแผ่นโพลาริเซอร์พบว่าแสงที่ผ่านออกมาจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น แต่ภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง CCTV กลับมีความสว่างลดลง ซึ่งคล้ายกับภาพถ่ายการสะท้อนจากน้ำ แต่แตกต่างที่ภาพถ่ายการสะท้อนของน้ำข้าวจะมีการกระเจิงมากกว่า

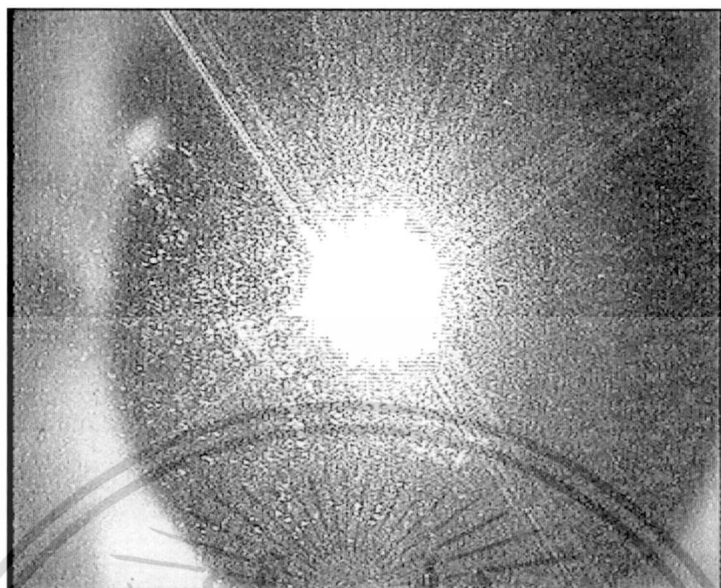


รูปที่ 4.16 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา

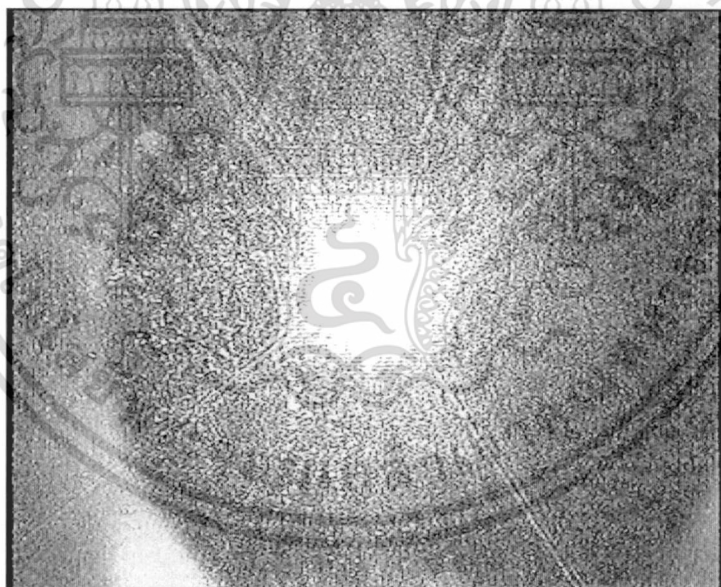


รูปที่ 4.17 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

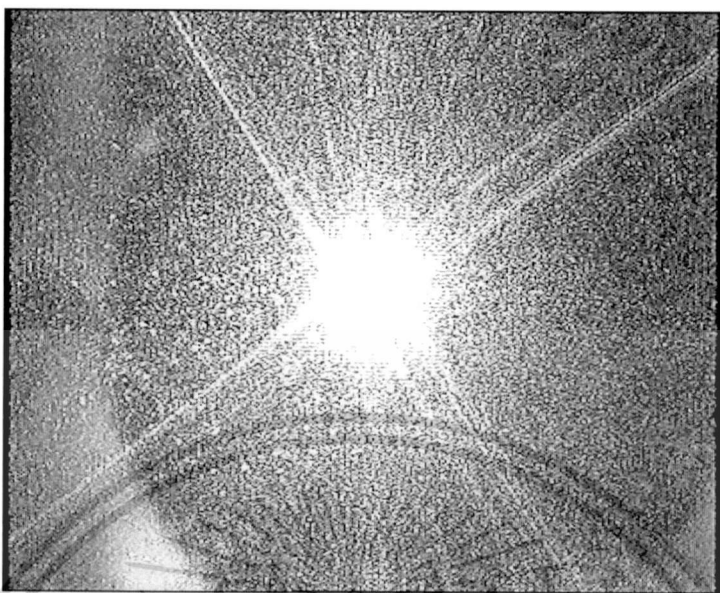


รูปที่ 4.18 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 60 องศา



รูปที่ 4.19 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

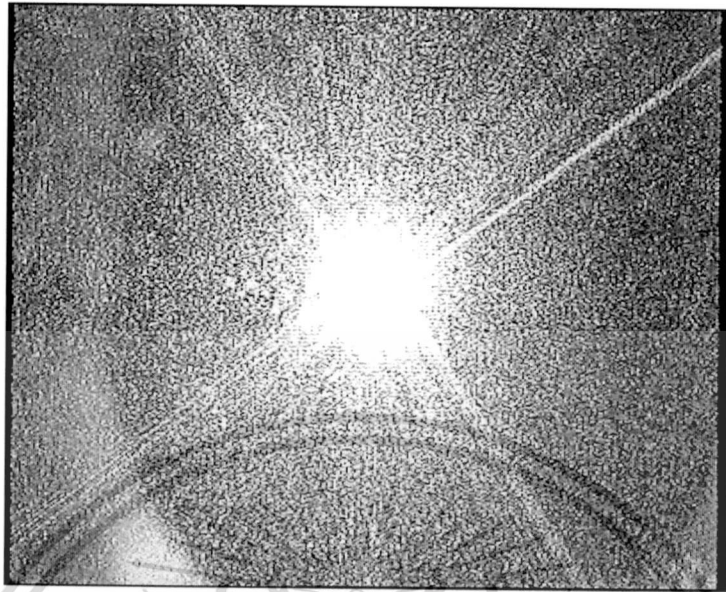


รูปที่ 4.20 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 30 องศา



รูปที่ 4.21 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 15 องศา

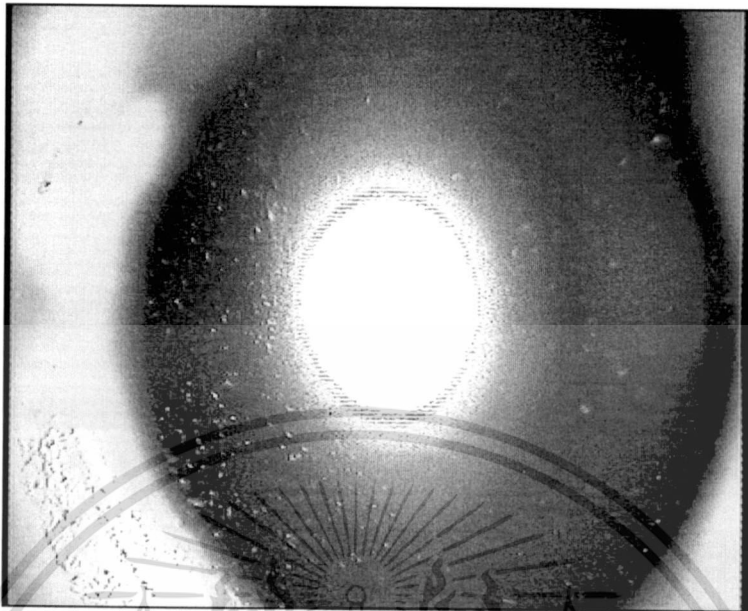
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุขาวดอกมะลิ 105 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 0 องศา

4.5 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุหุมนธานี 1 ที่มุมบรีวิสเตอร์

ภาพถ่ายจากการปรับแผ่นโพลาริเซอร์ที่บิดทำมุม 90, 75, 60, 45, 30, 15, และ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, และ 4.29 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าที่มุมโพลาริซ์ 90 องศา จะมีแสงสว่างน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะแสงสะท้อนที่มุมบรีวิสเตอร์มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแผ่นโพลาริเซอร์นั่นเอง เมื่อทำการลดมุมของแผ่นโพลาริเซอร์พบว่าแสงที่ผ่านออกมาจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น แต่ภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง CCTV กลับมีความสว่างลดลง ซึ่งคล้ายกับภาพถ่ายการสะท้อนจากน้ำ แต่แตกต่างที่ภาพถ่ายการสะท้อนของน้ำข้าวจะมีการกระเจิงมากกว่า

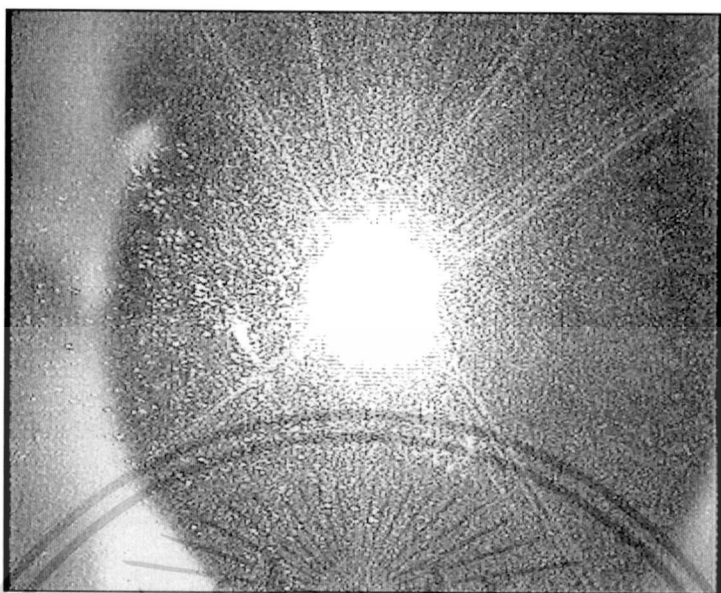


รูปที่ 4.23 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 90 องศา



รูปที่ 4.24 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุปทุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพุ้นรูปทรงแฉานี่ 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 60 องศา

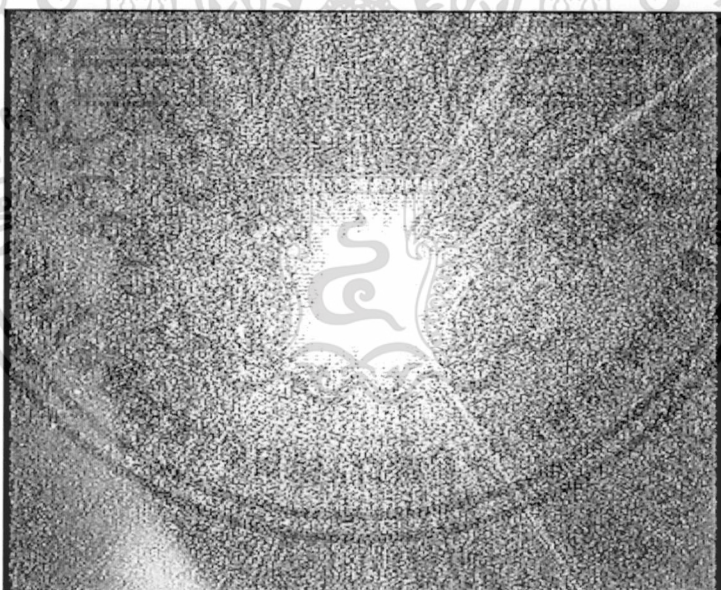


รูปที่ 4.26 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพุ้นรูปทรงแฉานี่ 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลารอยด์ที่มุม 30 องศา



รูปที่ 4.28 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุมธานี 1 ผ่านแผ่นโพลารอยด์ที่มุม 15 องศา

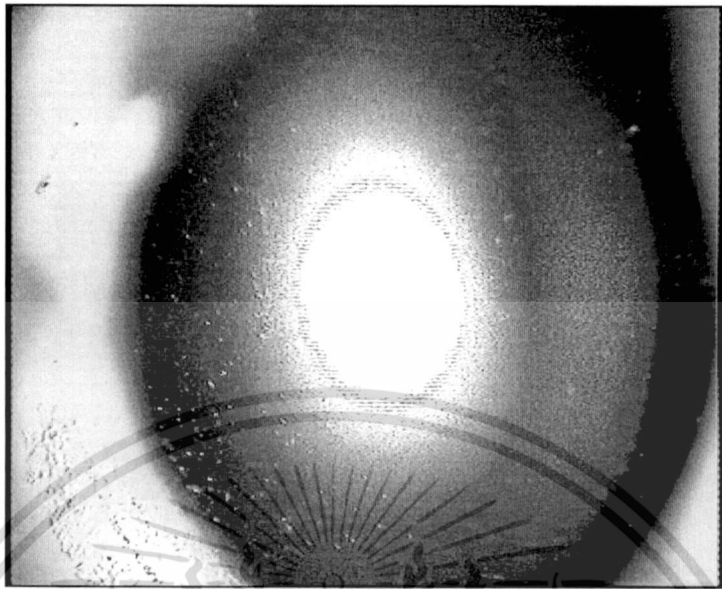
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์หุมนธานี 1 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 0 องศา

4.6 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่มุมบริวิสเตอร์

ภาพถ่ายจากการปรับแผ่นโพลาริเซอร์ที่บิดทำมุม 90, 75, 60, 45, 30, 15, และ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, และ 4.36 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าที่มุมโพลาริซ์ 90 องศา จะมีแสงสว่างน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะแสงสะท้อนที่มุมบริวิสเตอร์มีโพลาริซ์ตั้งฉากกับแผ่นโพลาริเซอร์นั่นเอง เมื่อทำการลดมุมของแผ่นโพลาริเซอร์พบว่าแสงที่ผ่านออกมาจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น แต่ภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง CCTV กลับมีความสว่างลดลง ซึ่งคล้ายกับภาพถ่ายการสะท้อนจากน้ำ แต่แตกต่างที่ภาพถ่ายการสะท้อนของน้ำข้าวจะมีการกระเจิงมากกว่า

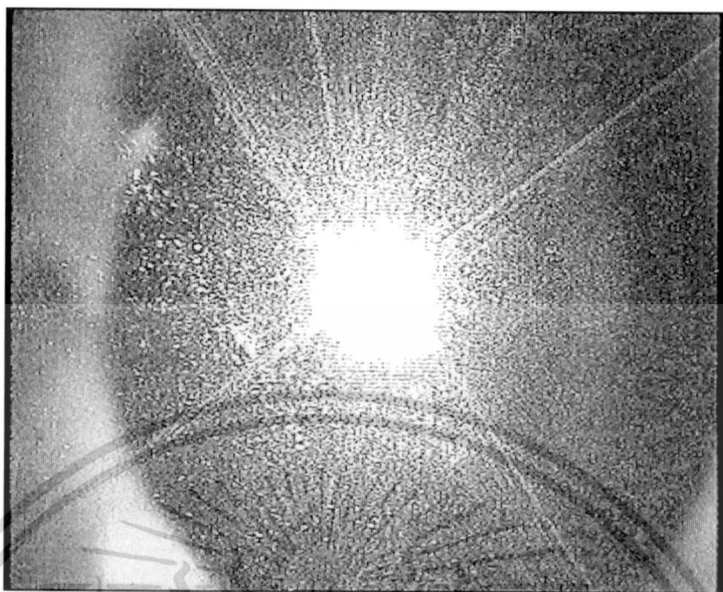


รูปที่ 4.30 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา



รูปที่ 4.31 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

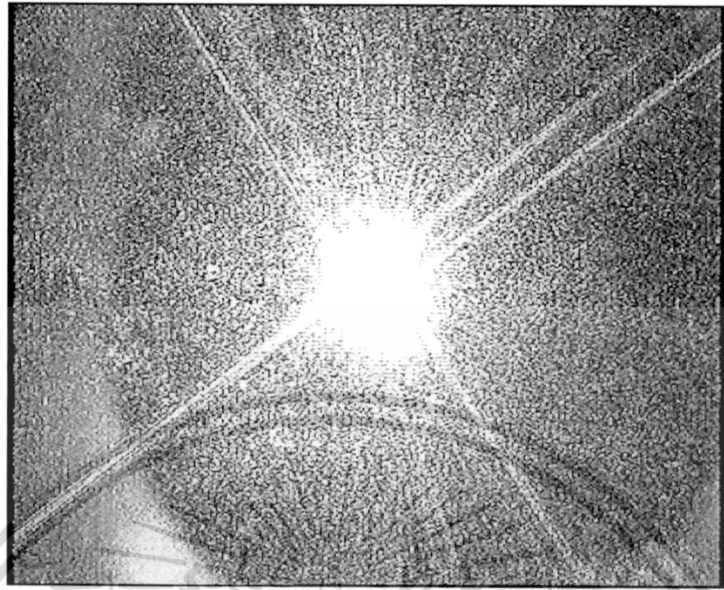


รูปที่ 4.32 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 60 องศา

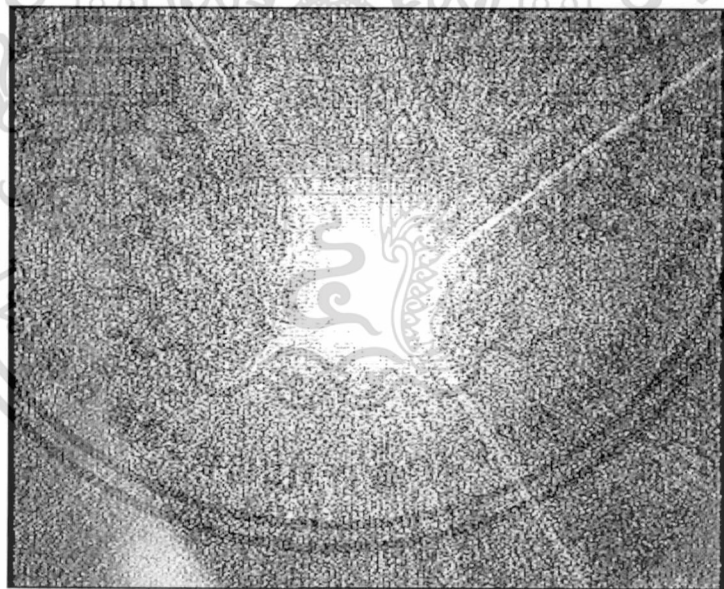


รูปที่ 4.33 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

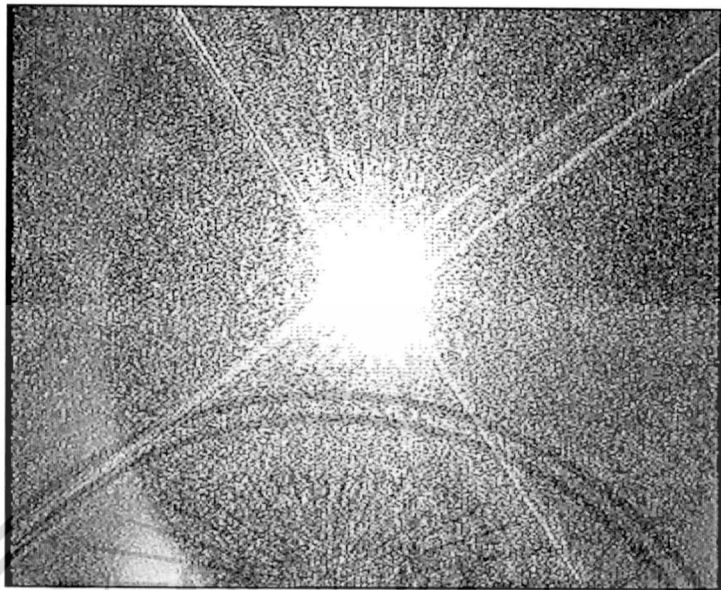


รูปที่ 4.34 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 30 องศา



รูปที่ 4.35 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 15 องศา

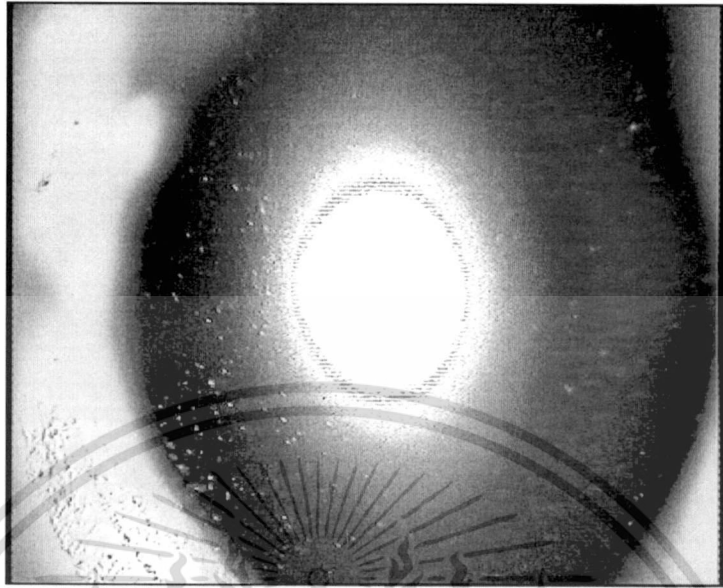
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุสุพรรณบุรี 60 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 0 องศา

4.7 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ กข. 23 ที่มุมบริวิสเตอร์

ภาพถ่ายจากการปรับแผ่นโพลาริเซอร์ที่บิดทำมุม 90, 75, 60, 45, 30, 15, และ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 4.37, 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, และ 4.43 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าที่มุมโพลาริซ์ 90 องศา จะมีแสงสว่างน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะแสงสะท้อนที่มุมบริวิสเตอร์มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแผ่นโพลาริเซอร์นั่นเอง เมื่อทำการลดมุมของแผ่นโพลาริเซอร์พบว่าแสงที่ผ่านออกมาจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น แต่ภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง CCTV กลับมีความสว่างลดลง ซึ่งคล้ายกับภาพถ่ายการสะท้อนจากน้ำ แต่แตกต่างที่ภาพถ่ายการสะท้อนของน้ำข้าวจะมีการกระเจิงมากกว่า



รูปที่ 4.37 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 90 องศา



รูปที่ 4.38 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 75 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

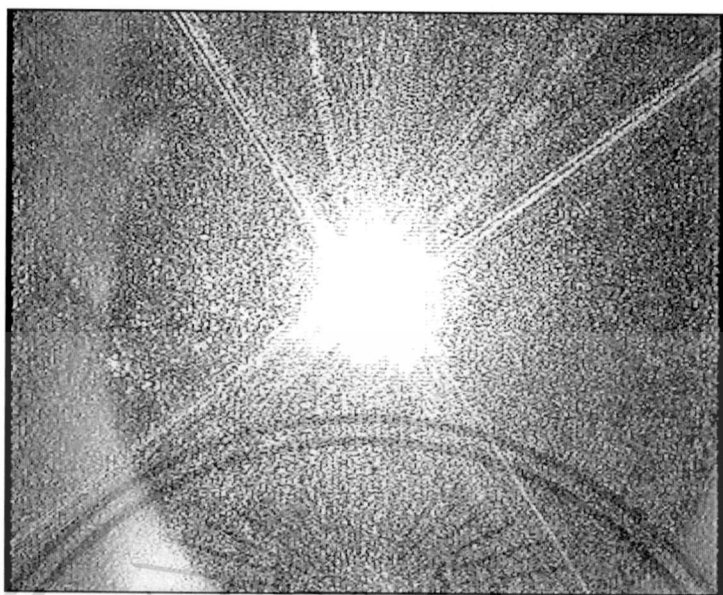


รูปที่ 4.39 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 60 องศา

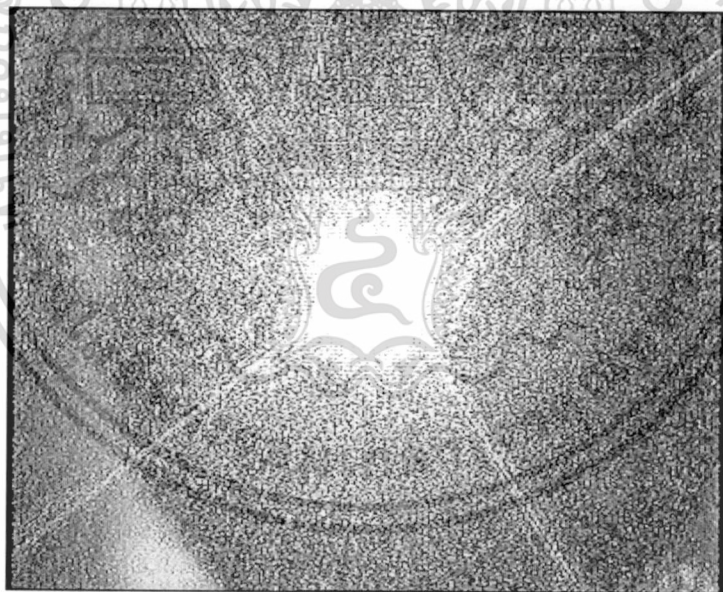


รูปที่ 4.40 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ์ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

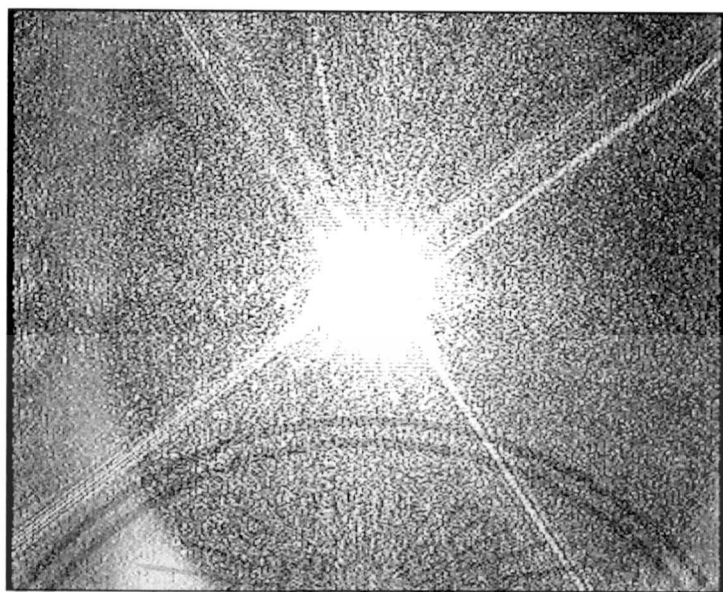


รูปที่ 4.41 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มม 30 องศา



รูปที่ 4.42 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มม 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 แสงสะท้อนจากน้ำข้าวพันธุ กข. 23 ผ่านแผ่นโพลาริเซออร์ที่มุม 0 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้