

# การสร้างและประยุกต์ใช้งานเครื่องวัด Stokes parameters แบบอัตโนมัติ

สุรัชย์ นพรัตน์แจ่มจรัส<sup>1</sup> รัชภาคย์ จิตต์อารี<sup>2</sup> และ เชิญโชค ศรขวัลญ<sup>3</sup>

## Abstract

Nopparatjamjomras, S., Chitaree, R. and Soankwan, C.

**Construction and application of an automatic Stokes parameters photopolarimeter**

Songklanarin J. Sci. Technol., 2004, 26(2) : 285-294

Stokes parameters are used to describe the polarization state of the beam. The Stokes parameters can be used to analyze the properties of a sample in terms of retardation and specific rotation. As several conventional instruments for measuring the Stokes parameters involve many procedures and a lot of time is required, the application area is limited. Therefore, to lessen the measuring period and widen the application area, in this research, an automatic instrument for determining the state of polarization based on a technique employing Fourier analysis coupled with some simple computer controlled electronic circuits are proposed. The technique of this measurement is called "Fourier analysis using a rotating quarter wave plate". This system is composed of a rotating quarter wave plate controlled by a stepping motor, a fixed linear horizontal polarizer and a detector. The intensities obtained from the receiving detector are analyzed with Simpson's method and Fourier Analysis to calculate the Stokes parameters. The performance of the instrument was preliminary examined by measuring several known polarized beams. In addition, the instrument was used as a tool to determine the specific rotation of D-glucose and phase shift of known retardances. The experimental results were found to be in agreement with theoretical results.

**Key words :** polarization analyzer, polarization applications, Stokes parameters

Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, Racha Tevi, Bangkok 10400 Thailand.

<sup>1</sup>วท.ม. (ฟิสิกส์) <sup>2</sup>Ph.D. (Electrical Engineering) <sup>3</sup>M.Eng (Electrical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

Corresponding e-mail : sumuetu37@yahoo.com

รับต้นฉบับ 19 มิถุนายน 2546

รับลงพิมพ์ 2 ธันวาคม 2546

### บทคัดย่อ

สุรัชย์ นพรัตน์แจ่มจำรัส รัชภาคย์ จิตต์อารี และ เชิญโชค ศรขวัญ  
 การสร้างและประยุกต์ใช้งานเครื่องวัด Stokes parameters แบบอัตโนมัติ  
 ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(2) : 285-294

Stokes parameters เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายสถานะโพลาไรซ์ของแสง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่าง เช่น ค่าความหน่วงเฟส ค่าการหมุนจำเพาะ เป็นต้น แต่เครื่องมือที่ใช้ในการวัด Stokes parameters ทั่วไปนั้น มีขั้นตอนและใช้เวลาในการวัดมาก ทำให้ไม่สะดวกต่อการประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นเพื่อที่จะลดขั้นตอนและเวลาในการวัด ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงแบบอัตโนมัติ โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ "การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของสัญญาณที่ผ่านตัวหน่วงเฟส 90° ที่มุมต่าง ๆ" ระบบที่ใช้ในเครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์นี้ ประกอบด้วย ตัวหน่วงเฟส 90° ที่สามารถหมุนได้ด้วยสแต็ปปีงมอเตอร์ ตัวสร้างสถานะโพลาไรซ์เชิงเส้น และตัววัดความเข้มแสง โดยนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ เทคนิคที่ใช้ในการอินทิเกรต คือ "วิธีการของ Simpson" เพื่อหาค่า Stokes parameters โดยคอมพิวเตอร์ ในเบื้องต้นการทดสอบเครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงที่สร้างขึ้นดำเนินการโดยทำการวัดแสงที่ทราบสถานะโพลาไรซ์ ปรากฏผลว่าสามารถตรวจวัดสถานะโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลงได้ จากนั้นจึงนำไปศึกษาพฤติกรรมทางแสงและหาค่าความหน่วงเฟสของตัวอย่าง ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากทฤษฎี

สมบัติโพลาไรเซชันของแสง สามารถอธิบายได้จากการพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายเวกเตอร์ลิพส์ขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y โดยการเปลี่ยนตำแหน่งเป็นไปได้ 3 ลักษณะ (สถานะ) คือ เส้นตรง วงกลมและวงรี โดยทั่วไปการระบุว่า สถานะโพลาไรซ์ของแสงเป็นแบบใด นิยมใช้ Stokes parameters ซึ่งเป็นปริมาณที่วัดได้ในรูปแบบของความเข้มแสง สามารถประยุกต์โพลาไรเซชันกับงานทางด้านการวัด การสื่อสาร การวิเคราะห์คุณสมบัติของสาร เช่น ความเข้มข้น ความหนา เป็นต้น โดยการเปรียบเทียบสถานะโพลาไรซ์ของแสงก่อนและหลังตกกระทบกับตัวอย่างที่ต้องการศึกษา

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงมีขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลาค่อนข้างมาก ทำให้เกิดข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการประดิษฐ์เครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงแบบอัตโนมัติ เพื่อลดเวลาและขั้นตอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ทางแสงและวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ ด้วยการใช้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายสถานะโพลาไรซ์ของแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Stokes

parameters เพราะสามารถใช้ในการอธิบายสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่เป็น โพลาไรซ์บางส่วน (partially polarized light) โพลาไรซ์บริบูรณ์ (completely polarized light) หรือ แสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์เลย (unpolarized light) (Collett, 1993)

### วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโพลาไรเซชันของแสงในแง่ของการประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัด และประยุกต์ความรู้ทางด้านฟิสิกส์ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และอิเล็กทรอนิกส์ มาสู่การใช้งานจริง

### ทฤษฎี

ในกรณีที่กำหนดให้แสงโพลาไรซ์เคลื่อนที่ไปตามแกน z องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์ในแนวแกน x และ y คือ  $E_x(z, t)$  และ  $E_y(z, t)$  สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (1a) และ (1b)

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \quad (1a)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \quad (1b)$$

เมื่อ  $E_{0x}, E_{0y}$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

$\delta_x, \delta_y$  คือ เฟสในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

จากความหมายของโพลาริเซชันในหัวข้อแรก และสมการที่ (1) ถ้าสนใจเฉพาะการเปลี่ยนสถานะโพลาริเซชันที่ตำแหน่งต่างๆ สมการที่ใช้ในการอธิบายโพลาริเซชันของแสงคือ

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2)$$

เมื่อ  $\delta = \delta_y - \delta_x$  เรียกว่า "ความต่างเฟส"

จะเห็นว่า สมการที่ (2) คือ สมการทั่วไปของวงรีรูปแสดงใน Figure 1 ดังนั้นจึงสามารถอธิบายลักษณะของแสงโพลาริเซชันได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ มุมที่แกนเอกของวงรีทำกับแกน x (มุมทิศ, azimuth,  $\Psi$ ) และ ภาวะวงรี (ellipticity,  $\sin 2\chi$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3a) และ (3b)

$$\tan 2\Psi = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} ; 0 \leq \Psi \leq \pi \quad (3a)$$

$$\sin 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y} \sin \delta}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} = \frac{b}{a} ; -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4} \quad (3b)$$

โดยทั่วไปในการอธิบายสถานะโพลาริเซชันของแสงนิยมอธิบายด้วยพารามิเตอร์ที่เรียกว่า "Stokes parameters" ซึ่งนิยามครั้งแรกโดย Sir George Gabriel Stokes ในปี ค.ศ.1852 (Hecht, 2002) ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว นิยามดังสมการที่ (4)

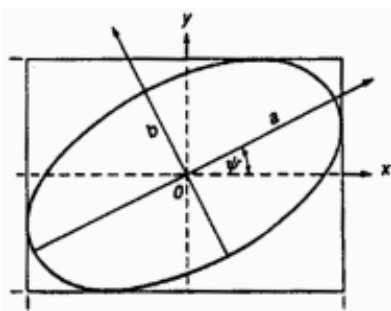


Figure 1. An elliptically polarized wave and the polarization ellipse. (Hecht, 2002)

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_{RCP} - I_{LCP} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{pmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ  $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{135}, I_{RCP}$  และ  $I_{LCP}$  คือ ความเข้มแสงของแสงโพลาริเซชันเชิงเส้นใน แนวนอน แนวตั้ง แนว  $45^\circ$  แนว  $135^\circ$  แสงโพลาริเซชันวงกลมแบบวนตามเข็มนาฬิกา และวนทวนเข็มนาฬิกา ตามลำดับ ดังนั้นความหมายของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัว คือ ความเข้มแสงทั้งหมด โอกาสที่แสงจะมีสถานะเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวนอน หรือ แนวตั้ง แนว  $45^\circ$  หรือ แนว  $135^\circ$  และโพลาริเซชันแบบวงกลมวนตามเข็มนาฬิกา หรือ วนทวนเข็มนาฬิกา ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวเป็นดังสมการที่ (5)

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (5)$$

ในกรณีของแสงโพลาริเซชันบริบูรณ์สองข้างของสมการ (5) จะมีค่าเท่ากัน

วิธีที่ใช้ในการวัดสถานะโพลาริเซชันมีหลายวิธี อธิบายใน (Collett, 1993), (Brosseau, 1998), (Stenflo, 1984) และ (Gregory et al, 1999) แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีที่เรียกว่า "การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของสัญญาณที่ผ่านตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ที่มุมต่างๆ " (Collett, 1993) เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ดี อุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อนเกินไป และยังสามารถพัฒนาต่อไปได้

Figure 2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในเทคนิคนี้ แสงที่ต้องการวัดสถานะโพลาริเซชันจะเดินทางผ่านตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  (quarter wave plate) ที่สามารถหมุนได้ ตัวสร้างสถานะโพลาริเซชันเชิงเส้น (linear polarizer) และตัวตรวจจับสัญญาณแสง

โดยในการเก็บข้อมูลนั้นเราจะทำการเก็บค่าความเข้มแสงที่ผ่านตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ที่มุมต่างๆ จากที่  $0^\circ$  จนครบ  $360^\circ$  โดยเริ่มแรกแกนเร็ว (fast axis) ของตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ต้องขนานกับแกน (transmission axis) ของตัวสร้างสถานะโพลาริเซชันเชิงเส้น

ความเข้มแสงที่วัดได้สามารถเขียนในรูปของ Stokes parameters และมุมระหว่างแกนเร็วของตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  กับแกนของตัวสร้างสถานะโพลาริเซชันเชิงเส้น ( $\theta$ ) ตาม

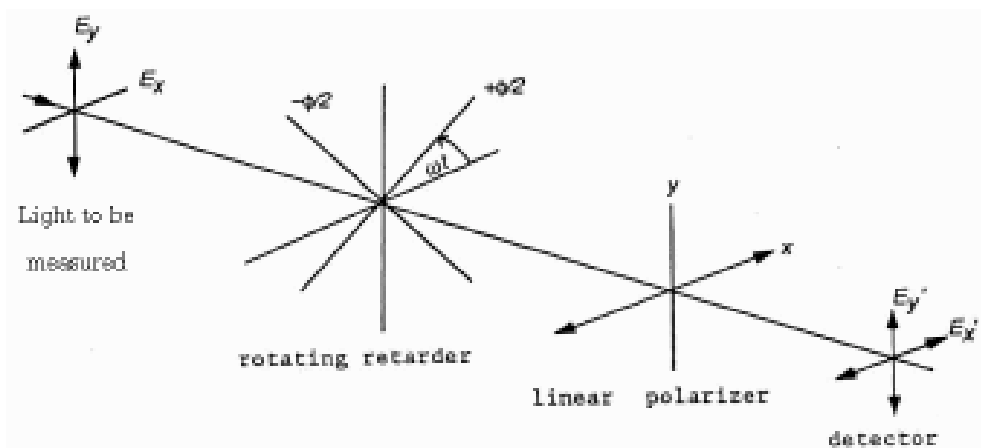


Figure 2. The arrangement of the optical components used in the Fourier analysis using a rotating quarter-wave retarder method.

สมการที่ (6)

$$I(\theta) = \frac{1}{2} [A + B \sin 2\theta + C \cos 4\theta + D \sin 4\theta] \quad (6)$$

เมื่อ  $A = S_0 + \frac{S_1}{2}$ ,  $B = S_3$ ,  $C = \frac{S_1}{2}$  และ  $D = \frac{S_2}{2}$

จะเห็นว่าสมการ (6) อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ โดยมีสัมประสิทธิ์ คือ A, B, C และ D ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์ ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถหาได้จากสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(\theta) d\theta \\ B &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} I(\theta) \sin 2\theta d\theta \\ C &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} I(\theta) \cos 4\theta d\theta \\ D &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} I(\theta) \sin 4\theta d\theta \end{aligned} \quad (7)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย Stokes parameters, azimuth, ellipticity และ ความเป็นโพลาไรซ์ (degree of polarization, P) สามารถหาได้จากสมการด้านล่างนี้

$$\begin{aligned} S_0 &= A - C \\ S_1 &= 2C \\ S_2 &= 2D \\ S_3 &= B \end{aligned} \quad \begin{aligned} \tan 2\psi &= \frac{S_2}{S_1} \\ \sin 2\chi &= \frac{S_3}{S_0} \end{aligned} \quad P = \frac{I_{pol}}{I_{tot}} = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}}{S_0} \quad 0 \leq P \leq 1$$

### อุปกรณ์และวิธีการ

จากหัวข้อทฤษฎี ข้อมูลที่ทำการเก็บคือ ค่าความเข้มแสงที่ผ่านตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ที่มุมต่างๆ ทำให้เราต้องทำการหมุนตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ไปที่มุมต่างๆ แล้วทำการอ่านค่าความเข้มแสงที่ได้ จากนั้นนำไปคำนวณต่อ ซึ่งเป็นการยากและใช้เวลานานที่เราจะทำการวิเคราะห์โดยการปรับมุมต่างๆ ด้วยมือ ดังนั้นเราจึงนำ สเต็ปป์มอเตอร์มาใช้ในการหมุนตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ไปยังมุมที่เราต้องการ แล้วทำการอ่านค่าความเข้มแสงเข้ามาเก็บในคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยในการอินทิเกรตเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการ (7) ต้องใช้เทคนิคการคำนวณทางตัวเลขเข้ามาช่วย ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้วิธีการของ Simpson เนื่องจากวิธีนี้สอดคล้องกับข้อมูลที่ทำการเก็บซึ่งมีลักษณะเป็นการรวมกันของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ (Gregory and Redmond, 1994) เพราะฉะนั้นสมการ (7) สามารถเขียนใหม่ดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{2}{3N} \left[ \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \left\{ 4 \sum_{n=2i+1}^N I(nh) + 2 \sum_{n=2i+2}^N I(nh) \right\} + I(0) - I(2\pi) \right] \\
 B &= \frac{4}{3N} \left[ \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \left\{ 4 \sum_{n=2i+1}^N I(nh) \sin(2nh) + 2 \sum_{n=2i+2}^N I(nh) \sin(2nh) \right\} \right] \\
 C &= \frac{4}{3N} \left[ \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \left\{ 4 \sum_{n=2i+1}^N I(nh) \cos(4nh) + 2 \sum_{n=2i+2}^N I(nh) \cos(4nh) \right\} + I(0) - I(2\pi) \right] \\
 D &= \frac{4}{3N} \left[ \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \left\{ 4 \sum_{n=2i+1}^N I(nh) \sin(4nh) + 2 \sum_{n=2i+2}^N I(nh) \sin(4nh) \right\} \right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลที่ทำการเก็บ  
 $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N$   
 $h = 2\pi/N$   
 $I(nh)$  คือ ความเข้มแสงที่ผ่านตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ที่  
 ทำมุม  $nh$  เรเดียน

Figure 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการจัดวาง  
 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยส่วนควบคุมประกอบด้วย  
 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 89C51RD2 ทำหน้าที่ในการ  
 ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์  
 ผ่านทางบอร์ดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ และส่งค่าความเข้มแสง  
 ที่แปลงจากบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด  
 20 บิต ให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

Figure 4 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้จริงในงานวิจัยนี้ ใน  
 การหมุนตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  เราใช้เฟืองเล็กขนาด 20 ฟัน  
 ติดกับสเต็ปปีงมอเตอร์ที่มีความละเอียด  $7.5^\circ/\text{step}$  ไปขับ  
 เฟืองใหญ่ขนาด 120 ฟัน ซึ่งติดอยู่กับตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ทำ  
 ให้สามารถเก็บข้อมูลได้สูงสุด 576 ข้อมูล เมื่อขับเคลื่อนสเต็ปปีง  
 มอเตอร์ด้วย half-phase mode

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เขียนด้วยภาษาซีของ Keil และ Visual C++  
 ชุดเครื่องมือที่เสร็จสมบูรณ์และโปรแกรมที่ใช้กับ  
 เครื่องมือนี้ แสดงใน Figure 5 และ 6 ตามลำดับ

#### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ก่อนที่จะมีการนำเครื่องมือที่สร้างขึ้นมาไปประยุกต์  
 ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสถานะโพลาไรซ์ของแสง ต้อง

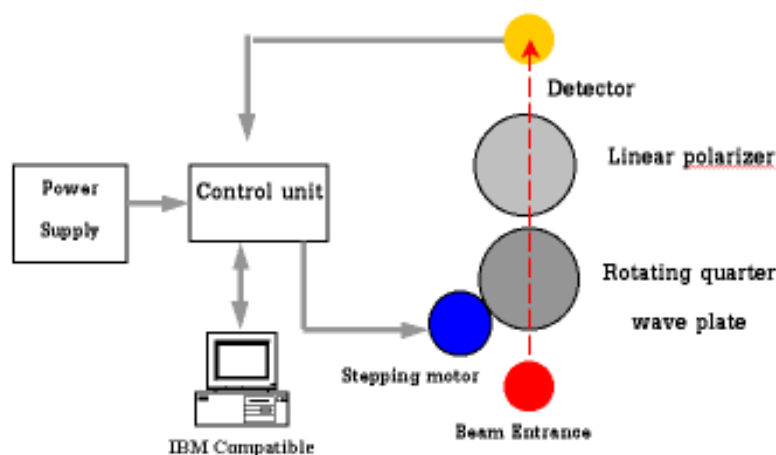


Figure 3. The block diagram of a polarization analyzer unit.

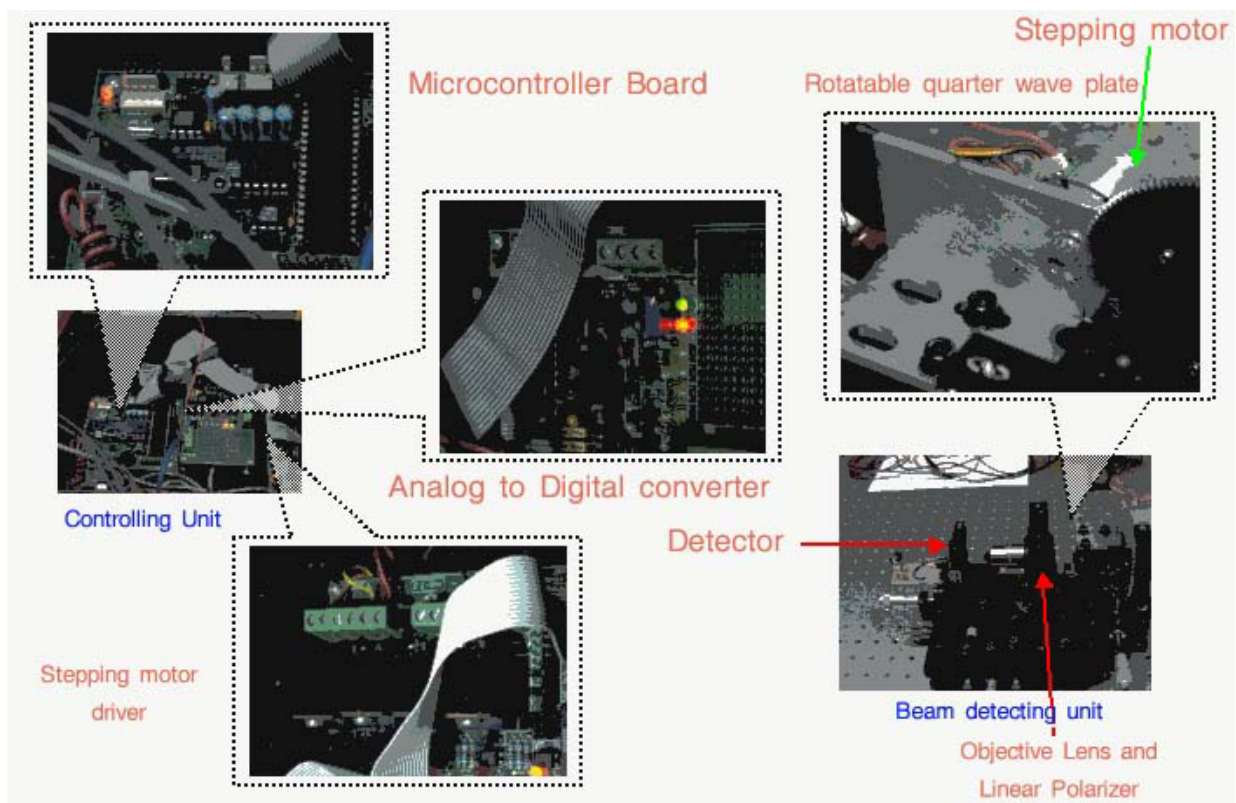


Figure 4. The major components of the polarization analyzer unit.

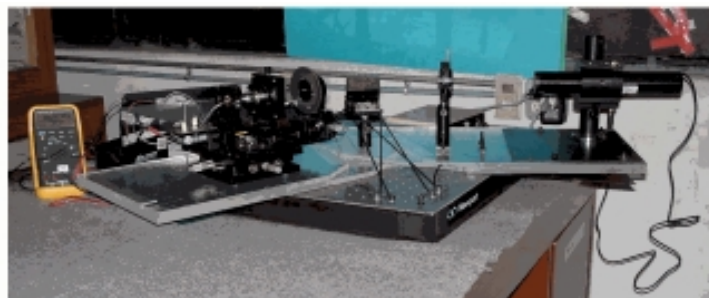


Figure 5. The complete setup of the polarization analyzer unit.

มันใจก่อนว่าเครื่องมือนี้สามารถตรวจวัดสถานะโพลาไรซ์  
ต่างๆ ได้ ด้วยการวัดสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ทราบค่า  
ซึ่งสร้างจากอุปกรณ์ทางแสงพื้นฐาน ได้แก่ ตัวสร้างสถานะ  
โพลาไรซ์เชิงเส้น ชนิด calcite ที่มีค่า extinction ratio  
มากกว่า 10,000 : 1 ตัวหน่วงเฟส 90° และตัวหน่วงเฟส  
180° ชนิด multiple-order quartz ที่มีค่า retardation  
accuracy เท่ากับ  $\pm\lambda/500$  ที่  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  (Newport,

2000) การจัดเรียงอุปกรณ์ที่ใช้แสดงดัง Figure 7

ในเบื้องต้นเราจำเป็นต้องทำการปรับตั้งตัวหน่วงเฟส  
90° และตัวสร้างสถานะโพลาไรซ์เชิงเส้นภายในเครื่องวัด  
สถานะโพลาไรซ์ก่อน โดยปรับให้แกนของทั้งสองอยู่ใน  
แนวที่ขนานกันและขนานกับแกนของตัวสร้างสถานะโพ  
ลาไรซ์เชิงเส้นที่ใช้ในการสอบเทียบ เรียกแกนนี้ว่า "แกน  
ของเครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์" จากนั้นจึงใส่อุปกรณ์

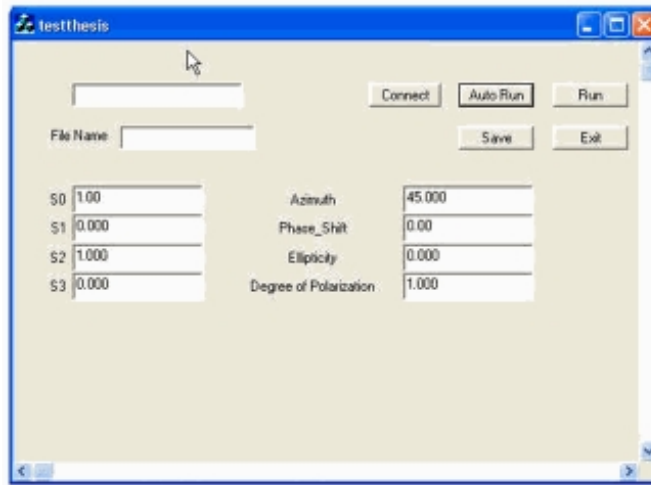


Figure 6. Window of the user interface program of the polarization analyzer unit.

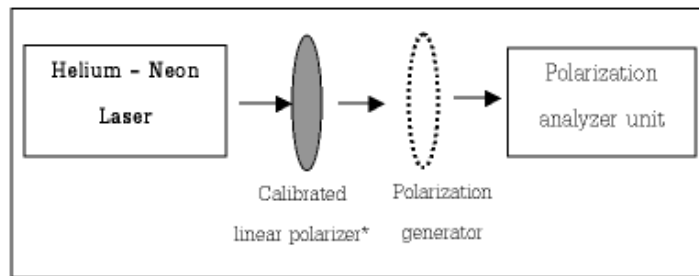


Figure 7. The arrangement of the optical components for a basic test of the polarization analyzer unit. (\*Used to produce a linear polarized light which has the plane of polarized parallel to an optic axis of the polarization analyzer unit.)

ที่ใช้ในการสร้างแสงโพลาไรซ์ ตรงตำแหน่งเส้นประใน Figure 7

ผลการทดสอบ แสดงในรูปของแถบความผิดพลาดของค่าความเข้มแสงที่ผ่านตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  (Normalized intensity) พาดบนเส้นกราฟแสดงค่าความเข้มแสงทางทฤษฎีซึ่งคำนวณได้จากสมการ (6) เทียบกับมุมระหว่างแกนของตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  กับแกนของเครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ (Step No. \* 2.5) โดย  $\theta'$  คือ มุมระหว่างแกนของตัวอย่างกับแกนของเครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ ค่าที่วิเคราะห์ได้แสดงในคำอธิบายได้รูป โดย Figure 8-9 เป็นผลการทดลองในกรณีที่ใช้ตัวสร้างสถานะโพลาไรซ์เชิงเส้นเป็นตัวสร้างแสงโพลาไรซ์ Figure 10-11 เป็นผลการทดลองในกรณีที่ใช้ตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  เป็นตัว

สร้างแสงโพลาไรซ์ Figure 12-13 เป็นผลการทดลองในกรณีที่ใช้ตัวหน่วงเฟส  $180^\circ$  เป็นตัวสร้างแสงโพลาไรซ์

ผลการทดสอบที่ได้มีค่าสอดคล้องกับทฤษฎี ซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดสถานะโพลาไรซ์ต่างๆ ได้ แต่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเกิดได้จากความไม่สมบูรณ์ของตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  และการที่ระนาบของอุปกรณ์ทางแสงไม่ตั้งฉากกับแนวทางเดินของแสง (tilt errors) (Williams, 1999 และ Williams *et al*, 1997) ความผิดพลาดจาก A/D (Surachai, 2002) ความผิดพลาดจากการคำนวณทางตัวเลข (numerical error) ซึ่งประกอบด้วย round off และ truncation error (Gregory *et al*, 1999)

ในส่วนของการประยุกต์ใช้เครื่องวิเคราะห์สถานะ

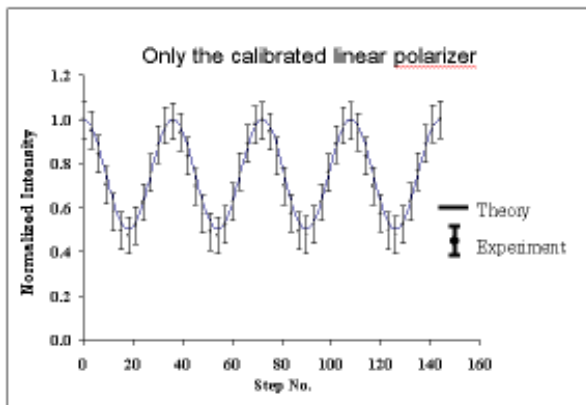


Figure 8. The average normalized Stokes parameters detected by the polarization analyzer unit are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 1.115$ ,  $S_2 = -0.124$ ,  $S_3 = -0.000$  and the azimuth is  $-3.166^\circ$ . The average normalized Stokes parameters calculated by using equation (6) are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 1.000$ ,  $S_2 = -0.000$ ,  $S_3 = 0.000$  and the azimuth is  $0.000^\circ$ .

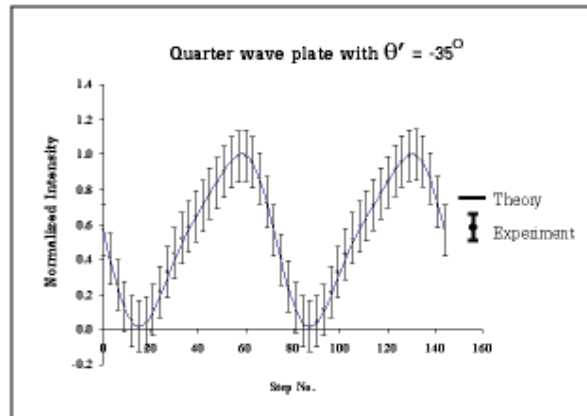


Figure 10. The average normalized Stokes parameters detected by the polarization analyzer unit are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.160$ ,  $S_2 = -0.380$ ,  $S_3 = -0.904$  and the azimuth is  $-33.556^\circ$ . The average normalized Stokes parameters calculated by using equation (6) are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 1.117$ ,  $S_2 = -0.321$ ,  $S_3 = 0.940$  and the azimuth is  $-35.000^\circ$ .

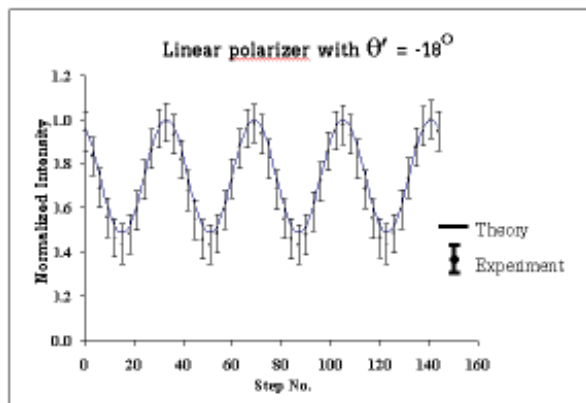


Figure 9. The average normalized Stokes parameters detected by the polarization analyzer unit are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.955$ ,  $S_2 = -0.651$ ,  $S_3 = -0.004$  and the azimuth is  $-17.128^\circ$ . The average normalized Stokes parameters calculated by using equation (6) are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.809$ ,  $S_2 = -0.588$ ,  $S_3 = 0.000$  and the azimuth is  $-18.000^\circ$ .

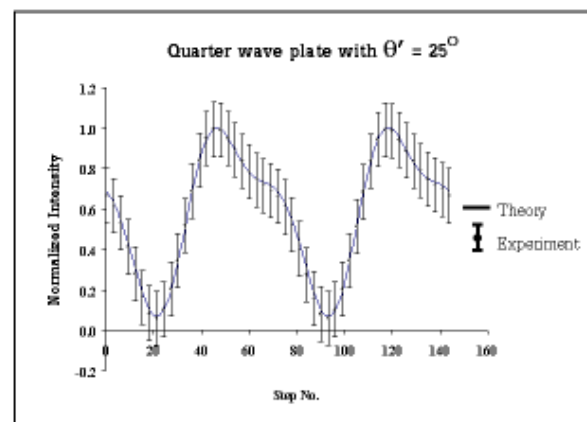
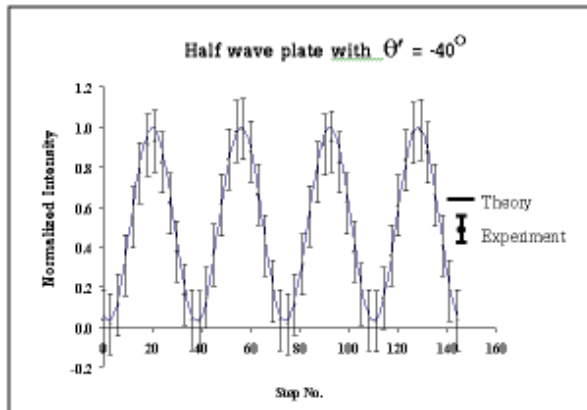


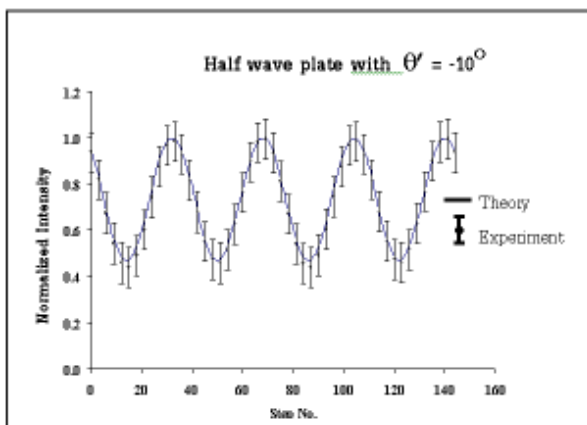
Figure 11. The average normalized Stokes parameters detected by the polarization analyzer unit are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.386$ ,  $S_2 = 0.460$ ,  $S_3 = -0.817$  and the azimuth is  $25.014^\circ$ . The average normalized Stokes parameters calculated by using equation (6) are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.413$ ,  $S_2 = 0.492$ ,  $S_3 = -0.766$  and the azimuth is  $25.000^\circ$ .

โพลาริซซ์ประกอบด้วย การหาค่าความหน่วงเฟสของ ตัวอย่างซึ่งประกอบด้วย ตัวอย่างที่ 1 คือ ตัวหน่วงเฟส  $90^\circ$  ตัวอย่างที่ 2 คือ ตัวหน่วงเฟส  $180^\circ$  ตัวอย่างที่ 3 คือ ตัว





**Figure 12.** The average normalized Stokes parameters detected by the polarization analyzer unit are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.960$ ,  $S_2 = -0.329$ ,  $S_3 = -0.034$  and the azimuth is  $-80.501^\circ$ . The average normalized Stokes parameters calculated by using equation (6) are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.940$ ,  $S_2 = -0.342$ ,  $S_3 = 0.000$  and the azimuth is  $-80.000^\circ$ .



**Figure 13.** The average normalized Stokes parameters detected by the polarization analyzer unit are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.860$ ,  $S_2 = -0.671$ ,  $S_3 = -0.023$  and the azimuth is  $-18.978^\circ$ . The average normalized Stokes parameters calculated by using equation (6) are  $S_0 = 1.000$ ,  $S_1 = 0.766$ ,  $S_2 = -0.643$ ,  $S_3 = 0.000$  and the azimuth is  $-20.000^\circ$ .

หน่วยเฟส  $90^\circ$  และตัวหน่วยเฟส  $180^\circ$  โดยที่แกนเร็วของทั้งสองขนานกัน และตัวอย่างที่ 4 คือ ตัวหน่วยเฟส  $90^\circ$  และตัวหน่วยเฟส  $180^\circ$  โดยที่แกนเร็วของทั้งสองตั้งฉากกัน ในการวิเคราะห์เราทำการวัด Stokes parameters ของแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง 2 ครั้ง คือ เมื่อแกนเร็วของตัวอย่างทำมุม  $0^\circ$  (S) และ  $45^\circ$  (S') กับแกนของเครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ (9) แล้วแก้สมการหาค่าความหน่วงเฟสของตัวอย่าง ( $\phi$ ) ผลการทดลองที่ได้แสดงใน Table 1

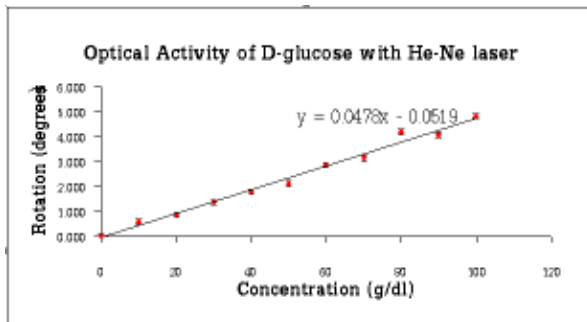
การหาค่าการหมุนจำเพาะของกลูโคส โดยหาจากกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0-100 g/dl โดยเพิ่มขึ้นขั้นละ 10 g/dl กับ มุมที่บิดไปของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ผ่านสารละลายแสดงใน Figure 14

$$\begin{bmatrix} S'_1 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_3 & S_1 \\ -S_1 & S_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

จาก Table 1 ค่าความหน่วงเฟสที่วัดได้มีค่าต่างจากทฤษฎีเล็กน้อย เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับตัวอย่างมีความละเอียดในการปรับมุมเป็น  $2^\circ$  ทำให้เกิดความผิดพลาดในการปรับมุมของตัวอย่างได้ และจาก Figure 14 ค่าการหมุนจำเพาะของกลูโคสที่หาได้จากความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้น และมุมที่ระนาบของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นบิดไป มีค่าเท่ากับ  $0.04780^\circ \text{cm}^{-1}(\text{g/dl})^{-1}$  เมื่อเทียบกับค่าจาก Cote *et al.* (1992) ซึ่งมีค่าเป็น  $0.04562^\circ \text{cm}^{-1}(\text{g/dl})^{-1}$  พบว่ามีค่าผิดพลาดไปจากค่าที่ระบุใน Cote

**Table 1.** The results of the retardation measurement.

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
<b>S0</b>	1.000	1.000	1.000	1.000
<b>S1</b>	0.016	-1.004	-0.113	0.016
<b>S2</b>	-0.019	-0.082	-0.055	-0.009
<b>S3</b>	-1.006	-0.051	1.004	1.005
<b>Retardance (Measured)</b>	$89.135^\circ$	$177.106^\circ$	$-96.407^\circ$	$89.119^\circ$
<b>Retardance (Theoretical)</b>	$90^\circ$	$180^\circ$	$-90^\circ$ or $270^\circ$	$90^\circ$



**Figure 14.** The relation between the optical rotation of the linear plane polarized light and the concentration of the D-glucose solution.

*et al.* (1992) 2.469% ซึ่งความผิดพลาดอาจเกิดจากความไม่แม่นยำของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไม่ละเอียดพอ

### วิเคราะห์ผลและสรุป

โดยสรุปแล้วงานวิจัยนี้สามารถสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงแบบอัตโนมัติที่เรียกว่า "เครื่องวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์" โดยยังมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง ซึ่งสาเหตุอาจมาจากความไม่สมบูรณ์ของตัวหน่วยเฟส  $90^\circ$  การที่ระนาบของอุปกรณ์ทางแสงไม่ตั้งฉากกับแนวทางเดินของแสง (tilt errors) (Williams, 1999 และ Williams *et al.*, 1997) ความผิดพลาดจาก A/D (Surachai, 2002) ความผิดพลาดจากการคำนวณทางตัวเลข (numerical error) ซึ่งประกอบด้วย round off และ truncation error (Gregory and Redmond, 1994)

ในส่วนของงานที่จะพัฒนาต่อไป คือ การแก้ไขความผิดพลาดของค่า Stokes parameters ที่วัดได้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของตัวหน่วยเฟส  $90^\circ$  ลดเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล เขียนโปรแกรมที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องมือโดยอัตโนมัติ และส่วนของแหล่งจ่ายไฟให้สามารถใช้ไฟ AC แทนแบตเตอรี่

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลงได้ ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคลากรในภาควิชา ดังนี้ นายเฉลิมศักดิ์ สุขวัฒนะกุล นายชัชวาล แสงดิษฐ์ นายจรูญ ชื่นชม ดร.ขวัญ อารยะชนิดกุล นายสะพรั่ง หงส์ทอง ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ และ ดร.วุทธิพันธ์ ปรัชญพฤทธิ

### เอกสารอ้างอิง

- Brosseau, C. 1998. Fundamentals of Polarized light: A statistical optics approach, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Collett, E. 1993. Polarized light: Fundamentals and Applications. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Cote, G.L., Fox, M.D. and Northrop, R.B. 1992. Noninvasive Optical Polarimetric Glucose Sensing Using a True Phase Measurement Technique. IEEE Trans. Bio-Med. Eng.; 39(7) : 752-756.
- Gregory D., Wiggeren, V. and Roy, R. 1999. High-speed fiber-optic polarization analyzer: measurements of the polarization dynamics of an erbium-doped fiber ring laser. Optics Commun.; 164 : 107-120.
- Gregory, J. and Redmond, D. 1994. Introduction to Numerical Analysis. Jones and Bartlett Publishers, Inc., USA.
- Hecht, E. 2002. 4<sup>th</sup> edition. Optics. Addison Wesley, the United States of America.
- Newport. Optics and Mechanics 1999/2000 Catalog.
- Stenflo, J.O. 1984. Solar magnetic and velocity-field measurements: new instrument concepts. Appl. Opt.; 23(8) : 1267-1278.
- Surachai Nopparatjamjomras. 2002. Importance of using the high resolution A/D for the data acquisition in the optical polarization state analysis. 28<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand at Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok: 732.
- Williams, P.A. 1999. Rotating-wave-plate Stokes polarimeter for differential group delay measurements of polarization-mode dispersion. Appl. Opt.; 38(31) : 6508-6515.
- Williams, P.A., Rose, A.H. and Wang, C.M. 1997. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement. Appl. Opt.; 36(25) : 6466-6472.