

# พฤติกรรมการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์/ไคโตซานไฮโดรเจล

## Electrical-sensitive behavior of poly(vinyl alcohol)/chitosan hydrogels

สุปราณี แก้วภิรมย์\* และนริศรา พันธุ์เวช

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

Supranee Kaewpirom\* and Narisara Panthuwet

Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand.

### บทคัดย่อ

ไคโตซาน (chitosan) ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากแกนหมึก (squid pen) พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยวิธี intrinsic viscosity จากนั้นนำมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ไฮโดรเจลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol); PVA) และไคโตซาน (PVA/chitosan hydrogels) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิคเซมิอินเทอร์เพนิตเรตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (semi-interpenetrating polymer network; semi-IPN) มีตัวริเริ่มและตัวเชื่อมโยงคือ 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPAP) และ acryloyl chloride ตามลำดับ จากการศึกษาความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุล (%EWC) ของ PVA/chitosan hydrogels พบว่าปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุล โดยถ้ามีปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาก PVA/chitosan hydrogels สามารถอุ้มน้ำได้ดี การศึกษาความสามารถในการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าโดยนำแผ่น PVA/chitosan hydrogels แขนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ แล้วให้แรงดันไฟฟ้า 15 โวลต์ พบว่าแผ่น PVA/chitosan hydrogels เกิดการเบนงอไปยังขั้วลบและเบนกลับในทิศทางตรงข้ามเมื่อหยุดให้แรงดันไฟฟ้า งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าของแผ่น PVA/chitosan hydrogels ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วย

**คำสำคัญ :** พอลิเมอร์ไฮโดรเจล อินเทอร์เพนิตเรตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค ความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุล พฤติกรรมการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

### Abstract

Chitosan was synthesized from squid pen and was characterized using FT-IR. The average molecular weight of the synthesized chitosan was estimated using intrinsic viscosity method. Poly(vinyl alcohol)(PVA)/chitosan hydrogels, at various compositions, were prepared by semi-interpenetrating polymer network (semi-IPN) technique. 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPAP) and acryloyl chloride were used as an initiator and a crosslinker, respectively. It was found that equilibrium water content (%EWC) of the polymer hydrogels increased with increasing poly(vinyl alcohol) content. The electrical response of the polymer hydrogels, immersed in various concentrations of NaCl solutions, was also investigated. With the application of a 15-volt-electric field, the polymer hydrogels bent toward the negative electrode and bent back toward the opposite direction when the electric stimulus was removed. The electrical sensitive behavior of the hydrogels at various compositions was also discussed.

**Keywords :** polymer hydrogel, interpenetrating polymer networks, equilibrium water content, electrical sensitive behavior.

\* Corresponding author. E-mail: kaewpiro@buu.ac.th

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจสารที่ได้จากธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไคติน-ไคโตซาน ซึ่งหาง่ายและมีประโยชน์มากในด้านการเกษตรและด้านอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้บำบัดน้ำเสีย ปรับผิวหน้ากระดาษ ใช้เป็นสารกันบูด และใช้เคลือบเมล็ดพันธุ์ นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ทางการแพทย์และเภสัชกรรม เนื่องจากไคโตซานมีประสิทธิภาพในการป้องกันจุลินทรีย์ (antibacterial activity) และเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ ร่างกายจึงไม่ต่อต้าน เช่นเดียวกับนักวิทยาศาสตร์สาขาอื่น ๆ นักวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ให้ความสนใจนำไคโตซานมาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์เจลซึ่งสามารถตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากภายนอก เช่น อุณหภูมิ pH สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก เป็นต้น (Galaev and Mattiasson, 1999; Jeong and Gutowska, 2002)

พอลิเมอร์เจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหภายในมีของเหลวแทรกอยู่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอก อาทิ อุณหภูมิ pH สนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก พอลิเมอร์เจลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้าง เช่น อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะชอบน้ำ (hydrophilic) ไปเป็นสภาวะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้ เป็นผลให้พอลิเมอร์เจลเกิดการยึดและหดตัว Shin et al., (2002) ทำการเตรียมพอลิเมอร์ไฮโดรเจลของ PVA และ PDMS พบว่าไฮโดรเจลที่ได้มีร้อยละการอุ้มน้ำที่สมดุล (%EWC) อยู่ในช่วง 50-53 โดยพอลิเมอร์ไฮโดรเจลที่มีสัดส่วนของ PVA มากที่สุดมีร้อยละการอุ้มน้ำที่สมดุลมากที่สุด Kim et al., (2003) พบว่าร้อยละการอุ้มน้ำที่สมดุลของ PVA/chitosan hydrogels จะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นและสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น และในปีเดียวกัน Kim et al., (2003) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมบวมตัว (swelling behavior) ของ PVA/chitosan hydrogels โดยเทคนิค FT-IR และ DSC พบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการบวมตัว (swelling ratio) ของไฮโดรเจลมีค่าอยู่ในช่วง 210-350% นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจลดังกล่าวขึ้นกับ pH ของสารละลายด้วย

ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์จึงมีความสนใจที่จะนำพอลิเมอร์เจลมาพัฒนาเพื่อใช้งานทางการแพทย์ Kim et al., (2002) ทำการสังเคราะห์ PVA/chitosan IPN hydrogels

เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์และอุตสาหกรรม (เช่น การนำไปประยุกต์ใช้เป็นก้ำกึ่งเนื้อเทียม อวัยวะเทียม และตัวควบคุมการปลดปล่อยยาโดยการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นต้น) และได้ศึกษาการอุ้มน้ำที่สมดุลในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ พบว่าร้อยละของการอุ้มน้ำที่สมดุลจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ไฮโดรเจลเกิดการยึด-หดตัวได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งมุมและความเร็วในการยึด-หดตัวของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

การศึกษาครั้งนี้เป็นการสังเคราะห์ไคโตซานจากแกนหมึก จากนั้นทำการยืนยันโครงสร้างของไคโตซานด้วยเทคนิค Infrared (IR) spectroscopy และหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยวิธี intrinsic viscosity ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol)) และไคโตซาน โดยเทคนิคเซมิอินเทอร์เพนเทรทิงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (semi-interpenetrating polymer networks; semi-IPNs) สุดท้ายทำการทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุลและความสามารถในการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าของพอลิเมอร์เจลที่สังเคราะห์ขึ้น

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

### สารเคมี

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH) AR grade (บริษัท Asia Pacific Specialty Chemical) กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid; HCl) (บริษัท Fisher Scientific) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol; PVA) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( $\bar{M}_w$ ) 145,000 g(mol)<sup>-1</sup> (บริษัท Fluka) อะคริลอิลคลอไรด์ (acryloyl chloride) GC grade (บริษัท Merck), 2,2-ไดเมทอกซี-2-ฟีนิลอะซีโตน (2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone, DMPAP) GC grade (บริษัท Fluka) เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran, THF) GC grade (บริษัท BDH Laboratory Supplies) กรดอะซิติก (acetic acid) (บริษัท BDH Laboratory Supplies) โซเดียมคลอไรด์ (sodium Chloride, NaCl) purity 99.9% (บริษัท Asia Pacific Specialty Chemical)

## เครื่องมือ

ตู้อบสูญญากาศ (vacuum oven) รุ่น 282 A Fisher Scientific หลอดยูวี (UV lamp) ขนาดกำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ Differential scanning calorimetry (DSC) รุ่น PYRIS Diamond DSC (บริษัท Perkin Elmer) Infrared Spectroscopy รุ่น system 2000 FT-IR (บริษัท Perkin Elmer) หม้อแปลงไฟฟ้าโวลต์ต่ำ GMC®

## วิธีทดลอง

### การเตรียมโคโตซานจากแกนหมึก

#### การเตรียมเบต้าไคตินจากแกนหมึก

นำแกนหมึกล้างให้สะอาดและตากแดดจัดๆ เป็นเวลา 1-2 วัน มาบดด้วยเครื่องบดอาหารให้มีขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร แช่แกนหมึกที่บดแล้วน้ำหนัก 75 กรัมในสาร NaOH เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 750 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองเอาส่วนที่เป็นสารละลายทิ้ง เติมสารละลาย NaOH เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 750 มิลลิลิตรลงไปอีกครั้ง คนให้เข้ากัน รีฟลักซ์ใน oil bath ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง กรองเอาส่วนที่เป็นสารละลายทิ้ง ล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง จนน้ำสุดท้ายที่ล้างมีค่าพีเอชประมาณ 7 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้แช่ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 750 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง จนน้ำสุดท้ายที่ล้างมีค่าพีเอชประมาณ 7 กรองเอาส่วนที่เป็นสารละลายทิ้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นนี้คือเบต้าไคติน ( $\beta$ -chitin)

#### การเตรียมโคโตซานจากเบต้าไคติน

นำเบต้าไคตินที่ได้มาแช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 30%w/v ปริมาตร 750 มิลลิลิตร รีฟลักซ์ใน oil bath เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง กรองเอาส่วนที่เป็นสารละลายทิ้ง ล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง จนน้ำสุดท้ายที่ล้างมีค่าพีเอชประมาณ 7 อบผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้แห้งในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโคโตซาน

## การเตรียมพอลิเมอร์ไฮโดรเจล

เติม acryloyl chloride และ DMPAP ลงในสารละลาย 9 %wt PVA (ในกรดอะซิติกเข้มข้น 4 %w/v) กวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ผสมกับสารละลาย 1 %wt โคโตซาน (ในกรดอะซิติกเข้มข้น 4 %w/v) กวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) และนำไปฉายแสงยูวีโดยวางจานเพาะเชื้อห่างจากหลอดยูวี 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 51 ชั่วโมง จะได้พอลิเมอร์เจลเป็นผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำพอลิเมอร์เจลที่ได้มาอบในตู้อบสูญญากาศ (vacuum oven) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง น้ำหนักและปริมาตรของ PVA โคโตซาน acryloyl chloride และ DMPAP ที่ใช้ในการเตรียม PVA/chitosan hydrogels ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 น้ำหนักและปริมาตรของสารที่ใช้ในการเตรียม PVA/chitosan hydrogels ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วน PVA/chitosan	น้ำหนักสาร (g)		ปริมาตร (ml)	น้ำหนัก (g)
	PVA	โคโต ซาน		
100/0	5.00	0.00	0.05	0.10
75/25	3.00	1.00	0.03	0.06
50/50	1.00	1.00	0.01	0.02
25/75	1.00	3.00	0.01	0.02
0/100	0.00	3.00	0.00	0.00

### การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ไฮโดรเจล

การทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุล (equilibrium water content, %EWC)

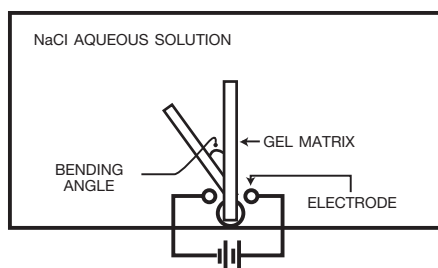
ชั่งน้ำหนักแผ่น PVA/chitosan hydrogels บันทึกลงเป็นน้ำหนักแห้ง ( $W_d$ ) แช่ในน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized (DI) water) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ใช้กระดาษกรองซับน้ำส่วนที่เกินออก ชั่งน้ำหนัก บันทึกลงเป็นน้ำหนักเปียก ( $W_w$ ) คำนวณหาร้อยละการอุ้มน้ำที่สมดุลโดยใช้สมการ (Kim et al., 1995)

ร้อยละการอุ้มน้ำที่สมดุล (%EWC) =  $(W_w - W_d) / W_w \times 100$

ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับแผ่น PVA/chitosan hydrogels อีกสองแผ่น (สามแผ่นสำหรับแต่ละอัตราส่วนของ PVA/chitosan hydrogels)

### การทดสอบความสามารถในการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

ตัดแผ่น PVA/chitosan hydrogels ที่อัตราส่วนต่างๆ ออกเป็นแผ่นเล็กๆ ขนาด 20x5 มิลลิเมตร และมีความหนาประมาณ 0.4 มิลลิเมตร หนีบด้วยไม้ไผ่ เพื่อป้องกันการงอตัวของชิ้นงาน นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปแช่ลงในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 %wt เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำแผ่น PVA/chitosan hydrogels ที่อิมมิดด้วยสารละลาย NaCl มายึดปลายด้านหนึ่งไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบในสารละลาย NaCl (ที่อุณหภูมิห้อง) โดยขั้วไฟฟ้าบวกและลบจะต่อเข้ากับคาร์บอนอิเล็กโทรด (carbon electrode) โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร (แสดงดังรูปที่ 1) จากนั้นให้ความต่างศักย์ขนาด 15 โวลต์แก่สารละลาย จับเวลาและอ่านมุมที่แผ่น PVA/chitosan hydrogels เบนไปทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งไม่เบนอีก หยุดให้ความต่างศักย์ และอ่านมุมที่แผ่น PVA/chitosan hydrogels เบนกลับทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งไม่เบนอีก



**รูปที่ 1** การวางชิ้นงานพอลิเมอร์ไฮโดรเจลในการทดสอบความสามารถในการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (Yuk and Lee, 1993).

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

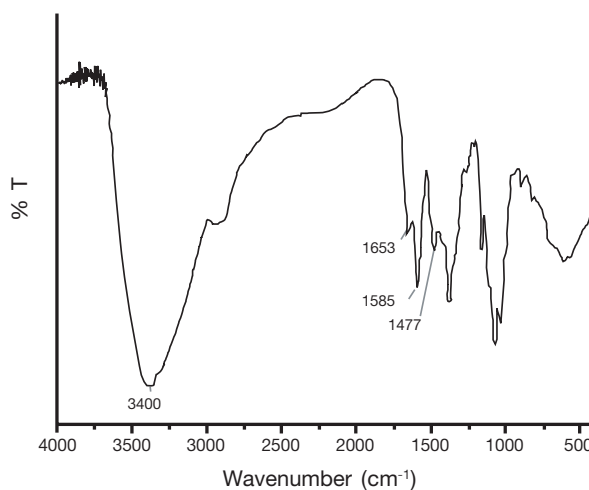
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโคโตซานจากการทดลองหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโคโตซานโดยวิธี intrinsic viscosity ( $[\eta] = 678.9, K = 1.8 \times 10^{-3} \text{ g/ml}$ ,

$a = 0.93$ ) พบว่ามีค่าเท่ากับ  $9.9 \times 10^5 \text{ g (mol)}^{-1}$  และจากการวิเคราะห์โครงสร้างของโคโตซานด้วยเทคนิค Infrared (IR) spectroscopy (system 2000 FT-IR; Perkin Elmer) พบว่าสเปกตรัมของฟิล์มโคโตซานที่สังเคราะห์ที่ได้แสดงสัญญาณที่  $1653 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็น amide band จากหมู่ acetamide ที่เหลืออยู่ใน chitosan และสัญญาณที่  $1585$  และ  $1477 \text{ cm}^{-1}$  จากหมู่อะมิโนในโคโตซาน นอกจากนี้ยังพบสัญญาณที่ประมาณ  $3400 \text{ cm}^{-1}$  จากหมู่ OH ในโคโตซาน สเปกตรัมของฟิล์มโคโตซานแสดงได้ดังรูปที่ 2

### ความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุล (equilibrium water content, %EWC) ของ PVA/chitosan hydrogels

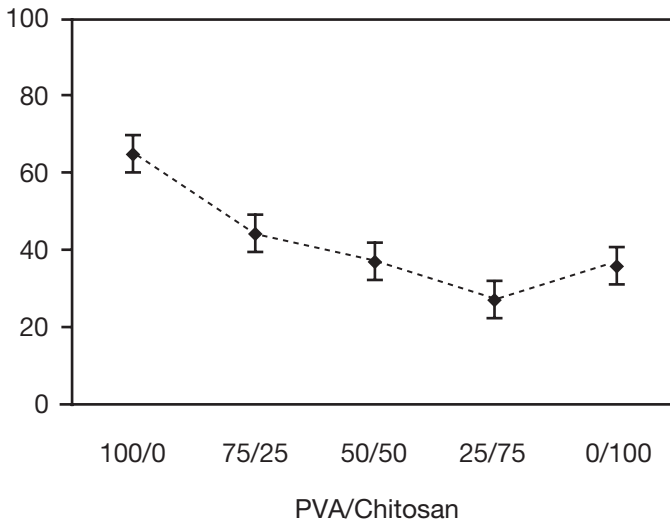
จากการทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุลของ PVA/chitosan hydrogels พบว่ามีค่าร้อยละการอุ้มน้ำที่สมดุลอยู่ในช่วง 27 - 45% ดังแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 พอลิไวนิลอัลกอฮอล์มีความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุล (65%) มากกว่าโคโตซาน (36%) ทั้งนี้เนื่องมาจากพอลิไวนิลอัลกอฮอล์มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic nature) ที่ดี (Bourke et al., 2003; Shin et al., 2002) ดังนั้นเมื่อเติมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ลงไปไฮโดรเจลของพอลิเมอร์ผสม จึงทำให้ PVA/chitosan hydrogels มีความสามารถในการอุ้มน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าที่อัตราส่วนของ PVA/chitosan ที่ 25/75 ความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุลของ PVA/chitosan hydrogel ลดลงเหลือ 27% ซึ่งน้อยกว่าความสามารถในการอุ้มน้ำที่สมดุลของโคโตซาน

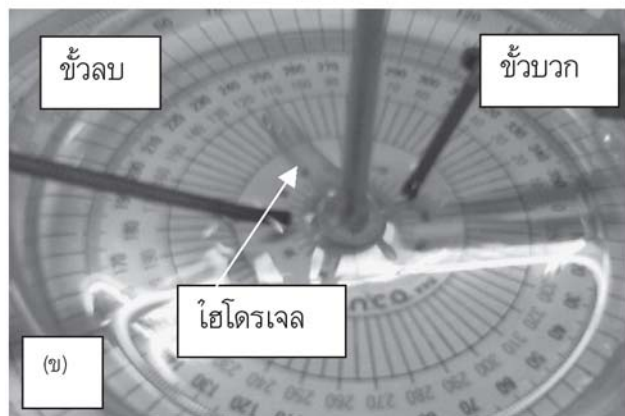
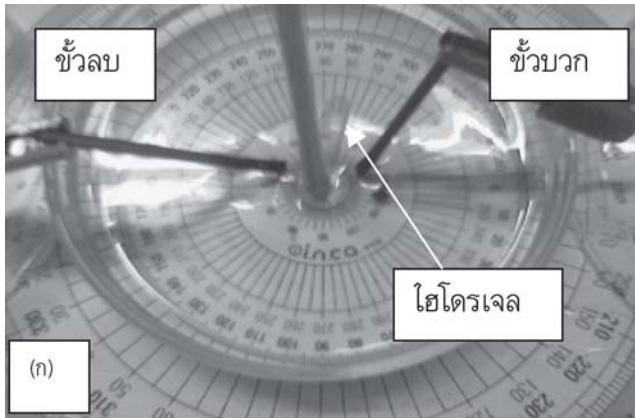


**รูปที่ 2** FT-IR spectra ของแผ่นฟิล์มโคโตซาน





**รูปที่ 3** ร้อยละของการอุ้มน้ำที่สมดุล (%EWC) ของ PVA/chitosan hydrogels ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

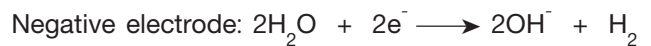


**รูปที่ 4** แผ่น PVA/chitosan hydrogel ในสารละลาย NaCl (ก) ก่อนให้กระแสไฟฟ้า และ (ข) ขณะให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่มีความต่างศักย์ 15 โวลต์

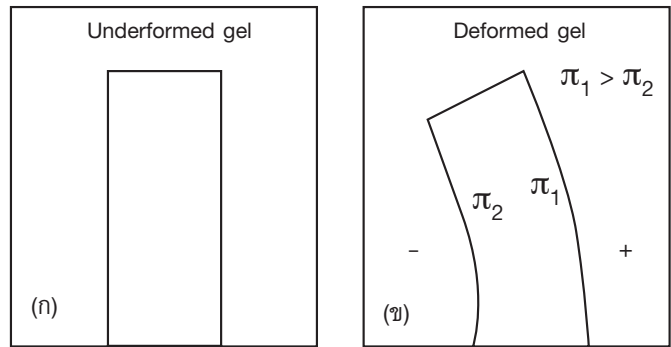
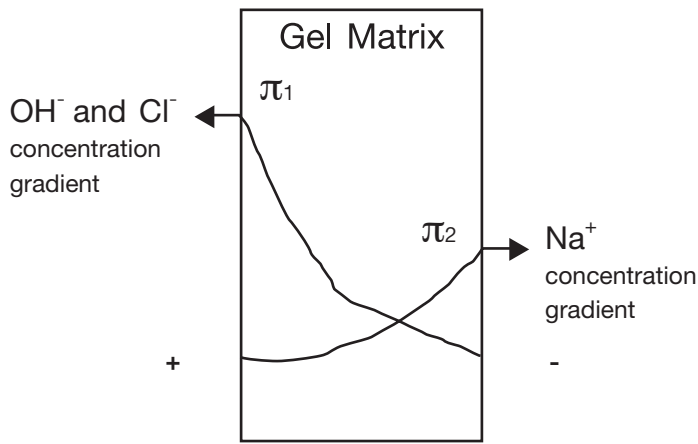
ความสามารถในการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ 15 โวลต์ผ่านลงไปนสารละลาย NaCl ที่มีแผ่น PVA/chitosan hydrogels แच्छอยู่ พบว่าแผ่น PVA/chitosan hydrogels ทุกอัตราส่วนจะตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าโดยการเบนเข้าหาขั้วลบ และเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้า จะค่อยๆ เบนกลับเข้าหาขั้วบวกแต่ไม่สามารถกลับสู่ตำแหน่งเดิมก่อนที่จะให้กระแสไฟฟ้าได้ (ดังรูปที่ 4) แต่เมื่อเปลี่ยนจากสารละลาย NaCl เป็นน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) พบว่าแผ่น PVA/chitosan hydrogels ไม่เกิดการเบนเข้าหาขั้วไฟฟ้าใดเลย ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าการเบนเข้าหาขั้วไฟฟ้าของแผ่น PVA/chitosan hydrogels เกิดจากการกระตุ้นของกระแสไฟฟ้านั่นเอง

ในการทดลองนี้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหลังจากให้กระแสไฟฟ้าผ่านลงไปนสารละลาย NaCl เขียนได้ดังนี้ (Dillard and Goldberg, 1978)

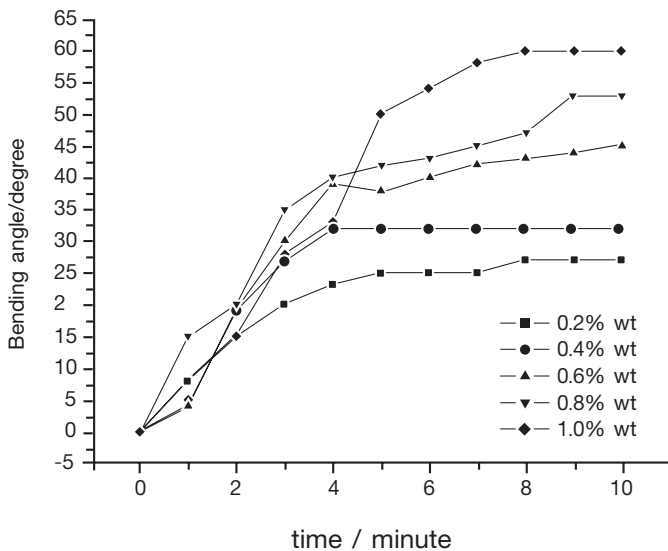


เมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปนสารละลายไอออนที่เคลื่อนที่ได้ (mobile ions) ได้แก่  $\text{Na}^+$  จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าลบ และ  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{OH}^-$  จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าบวก แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ของ  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{OH}^-$  ในสารละลายน้ำ (aqueous solution) มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ  $\text{Na}^+$  (Koryta, 1970) ไอออน  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{OH}^-$  จึงเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวกได้เร็วกว่า และในระหว่างที่ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปนพอลิเมอร์ไฮโดรเจลไคโตซานซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน  $\text{R-NH}_3^+$  (ประจุบวก) จะเกิดแรงดึงดูดกับไอออนลบ ( $\text{Cl}^-$  และ  $\text{OH}^-$ ) ทำให้ไอออนลบเหล่านั้นเกิดการสะสมอยู่บริเวณผนังของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลที่อยู่ใกล้กับขั้วไฟฟ้าบวก ในขณะที่ไอออนบวก ( $\text{Na}^+$ ) ก็เกิดการสะสมอยู่บริเวณผนังของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลที่อยู่ใกล้กับขั้วไฟฟ้าลบ แต่เนื่องจากความเข้มข้นของไอออนลบมีค่ามากกว่าไอออนบวก แรงดันออสโมติกบริเวณขั้วไฟฟ้าบวก ( $\pi_1$ ) จึงมีมากกว่าแรงดันออสโมติกบริเวณขั้วไฟฟ้าลบ ( $\pi_2$ ) [Yuk and Lee, 1993] (แสดงได้ในแผนภาพดังรูปที่ 5)

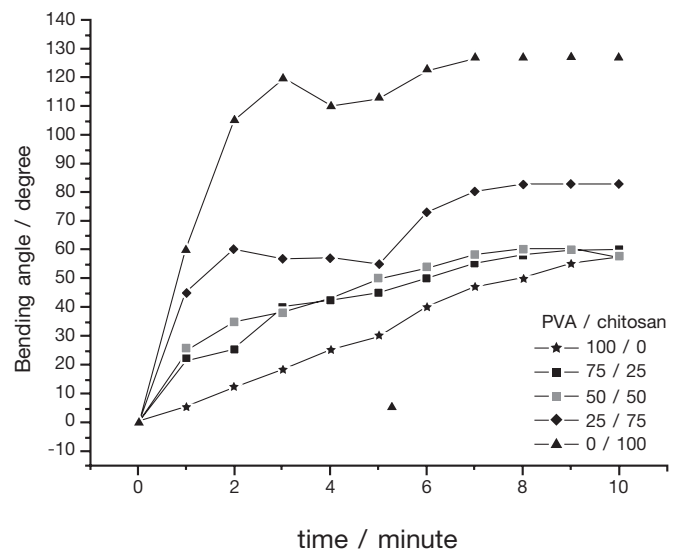


**รูปที่ 5** แผนภาพแสดงความเข้มข้นของไอออนในพอลิเมอร์ไฮโดรเจลขณะให้กระแสไฟฟ้า

**รูปที่ 6** แผนภาพการเบนของแผ่น PVA/chitosan hydrogels (ก) ก่อนให้กระแสไฟฟ้า (ข) ขณะให้กระแสไฟฟ้า



**รูปที่ 7** การเบนของแผ่น PVA/chitosan hydrogel (50/50) ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 %wt ขณะให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่มีความต่างศักย์ 15 โวลต์



**รูปที่ 8** การเบนของแผ่น PVA/chitosan hydrogels ที่อัตราส่วนต่างๆ (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100) ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 1.0 %wt ขณะให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่มีความต่างศักย์ 15 โวลต์

ดังนั้นความแตกต่างของแรงดันออสโมติกบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จึงเป็นผลให้ผนังทั้งสองด้านของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลมีการบวมตัวไม่เท่ากันจึงทำให้พอลิเมอร์ไฮโดรเจลเบนเข้าหาขั้วลบ คำอธิบายทำนองเดียวกันนี้ได้ถูกเสนอโดยกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่ม (Shiga et al., 1990; Doi et al., 1992; Tamagawa and Taya, 2000; Wallmersperger et al., 2004) รูปที่ 6 แสดงแผนภาพการเบนของแผ่น PVA/chitosan hydrogels ขณะให้กระแสไฟฟ้า

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaCl (0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 %wt) ต่อความเร็วในการเบน (bending speed) และองศาของการเบน (bending angle) ของ PVA/chitosan hydrogel อัตราส่วน 50/50 หลังจากให้กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ 15 โวลต์ (รูปที่ 7) พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaCl ไม่มีผลต่อความเร็วในการเบนของ PVA/chitosan hydrogel ในช่วงเริ่มต้นของการให้กระแสไฟฟ้า (สังเกตจากความชันของกราฟที่เวลา 0-4 นาทีที่มีค่าใกล้เคียงกัน) แต่หลังจากให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 5 นาทีพบว่าองศาของการเบนของ PVA/chitosan hydrogel ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย NaCl โดยที่องศาของการเบนมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่รายงานโดย Kim และคณะในปี 2002 (Kim et al., 2002)

รูปที่ 8 แสดงผลของอัตราส่วนของ PVA/chitosan hydrogels (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100) ต่อความเร็วในการเบนและองศาของการเบนของ PVA/chitosan hydrogels ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 1.0 %wt ขณะให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่มีความต่างศักย์ 15 โวลต์ รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่า PVA/chitosan hydrogels 0/100 มีการตอบสนองต่อการกระตุ้นของกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุด กล่าวคือมีความเร็วในการเบนและองศาของการเบนสูงที่สุด แต่เมื่อมีการเติม PVA ลงไปความเร็วในการเบนและองศาของการเบนของ PVA/chitosan hydrogels มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นร่างแหของ PVA ซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยงของ acryloyl chloride มีผลให้ความสามารถในการให้ซึมผ่าน (permeability coefficient) และ partition coefficient (อัตราส่วนของความเข้มข้นของไอออนในพอลิเมอร์เจลต่อความเข้มข้นของไอออนในสารละลายทั้งหมด) ของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลมีค่าลดลง (Matsuyama et al., 1997) ดังนั้นไอออนที่เคลื่อนที่ได้ (mobile ions) ในสารละลายได้แก่  $\text{Na}^+$

$\text{Cl}^-$  และ  $\text{OH}^-$  จึงเคลื่อนที่เข้าไปในพอลิเมอร์ไฮโดรเจลได้น้อยลง เป็นผลให้การตอบสนองต่อการกระตุ้นของกระแสไฟฟ้าของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลมีค่าลดลงด้วย

## สรุป

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า PVA/chitosan hydrogels ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคเซมิอินเทอร์เฟนิงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค มีความสามารถในการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อนำแผ่น PVA/chitosan hydrogels แขนในสารละลาย NaCl แล้วผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่มีความต่างศักย์ 15 โวลต์ลงไปในสารละลายพบว่าแผ่น PVA/chitosan hydrogels เกิดการเบนไปยังขั้วลบและ เบนกลับในทิศทางตรงข้ามเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้านอกจากนี้ยังพบว่าองศาของการเบนมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อลดส่วนของ PVA เพิ่มขึ้นองศาของการเบนและความเร็วในการเบนมีค่าลดลง ดังนั้น PVA/chitosan hydrogels ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น การนำไปประยุกต์ใช้เป็นกักเก็บเนื้อเยื่อเทียม อวัยวะเทียม และตัวควบคุมการปลดปล่อยยาโดยการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณ ดร. ศิริเดช บุญแสง อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทดสอบการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า และขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนงบประมาณ วัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ทำการวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

Bourke, S.L.; Al-Khalili, M.; Briggs, T.; Michniak, B.B.; Kohn, J.; and Poole-Warren, L.A. 2003. A photo-crosslinked poly(vinyl alcohol) hydrogel growth factor release vehicle for wound healing applications. The American Association of Pharmaceutical Scientists Journal: Pharmaceutical Science 5(4): 1-11.

- Dillard, C.R.; and Goldberg, D.E. 1978. Chemistry. Macmillan. New York.
- Doi, M.; Matsumoto, M.; and Hirose, Y. 1992. Deformation of ionic polymer gels by electric fields. *Macromolecules* 25: 5504-5511.
- Galaev, I.Y.; and Mattiasson, B. 1999. 'Smart' polymers and what they could do in biotechnology and medicine. *Trends in Biotechnology* 17: 335-340.
- Jeong, B.; and Gutowska, A. 2002. Lesson from nature: stimuli-responsive polymers and their biomedical applications. *Trends in Biotechnology* 20: 305-311.
- Kim, S.J.; Lee, K.J.; Kim, S.I.; Lee, K.B.; and Park, Y.D. 2003. Sorption characterization of poly(vinyl alcohol)/chitosan interpenetrating polymer network hydrogels. *Journal of Applied Polymer Science* 90: 86-91
- Kim, S.J.; Park, S.J.; and Kim, S.J. 2003. Swelling behavior of interpenetrating polymer network hydrogels composed of poly(vinyl alcohol) and chitosan. *Reactive & Functional Polymer* 55: 53-59.
- Kim, S.J.; Park, S.J.; Kim, I.Y.; Shin, M.S.; and Kim, S.I. 2002. Electric stimuli responses to poly(vinyl alcohol)/chitosan interpenetrating polymer network hydrogels in NaCl solutions. *Journal of Applied Polymer Science* 86: 2285-2289.
- Kim, S.S.; Lee, Y.M.; and Cho, C.S. 1995. Synthesis and properties of semi-interpenetrating polymer networks composed of  $\beta$ -chitin and poly(ethylene glycol) macromer. *Polymer* 36(23): 4497-4501.
- Koryta, J.; Dvorak, J.; and Bohackova, V. 1970. Electrochemistry. Methuen, London.
- Matsuyama, H.; Teramoto, M.; and Urano, H. 1997. Analysis of solute diffusion in poly(vinyl alcohol) hydrogel membrane. *Journal of Membrane Science* 126: 151-160.
- Shiga, T.; and Kurauchi, T. 1990. Deformation of polyelectrolyte gels under the influence of electric field. *Journal of Applied Polymer Science* 39: 2305-2320.
- Shin, M.S.; Kim, S.J.; Kim, I.Y.; Kim, N.G.; Song, C.G.; and Kim, S.I. 2002. Swollen behavior of crosslinked network hydrogels based on poly(vinylalcohol) and poly(dimethylsiloxane). *Journal of Applied Polymer Science* 85: 957-964.
- Tamagawa, H.; and Taya, M. 2000. A theoretical prediction of the ions distribution in an amphoteric polymer gel. *Materials Science and Engineering A285*: 314-325.
- Wallmersperger, T.; Kroplin, B.; and Gulch, R.W. 2004. Coupled chemo-mechanical formulation for ionic polymer gels-numerical and experimental investigations. *Mechanics of Materials* 36: 411-420.
- Yuk, S.H.; and Lee, H.B. 1993. Electric-current-sensitive polymers. Reversible bending of rod-shaped acrylamide gel in NaCl solution. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. 31: 487-489.