

## การเตรียมและการศึกษาลักษณะของไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/ กรดมาเลอิก

ไพโรจน์ กลิ่นพิทักษ์<sup>1</sup> และ นันทนา อินทจันทร์<sup>2</sup>

### Abstract

Klinpituksa, P.<sup>1</sup> and Intajun, C.<sup>1</sup>

**Preparation and characterisation of acrylamide/maleic acid hydrogel**

Songklanakar J. Sci. Technol., 2005, 27(5) : 1103-1112

Acrylamide/maleic acid hydrogel, a superabsorbent polymer, was prepared by free radical polymerization in aqueous solution of acrylamide (AAM) and maleic acid (MA) : monomer and comonomer, respectively. Potassium persulfate and N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine were used as an initiator system. Also, ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) and N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) were used as crosslinkers. Different compositions of acrylamide, maleic acid and crosslinkers were employed. Water swelling, equilibrium water content and swelling power of the hydrogel formed were determined. The result showed that the swelling in water at equilibrium of hydrogels was in the range of 8,420-10,300% and 3,160-3,560%, equilibrium water content was in the range of 0.9880-0.9902 and 0.9630-0.9727 and swelling power was in the range of 84-103 and 31-36 using 1%EGDMA and 1%MBA as crosslinkers, respectively. The diffusion of water into hydrogel followed non-Fickian character based on swelling power.

**Key words :** hydrogel, water swelling, equilibrium water content, swelling power, non-Fickian

<sup>1</sup>Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani 94000 Thailand

<sup>1</sup>Doctorat (Chimie Organique Macromoleculaire), รองศาสตราจารย์ นักศึกษาหลักสูตร วท.บ. สาขาเคมีอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

Corresponding e-mail: kpairote@bunga.pn.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 7 มิถุนายน 2547      รับลงพิมพ์ 24 พฤษภาคม 2548

## บทคัดย่อ

ไพโรจน์ กลิ่นพิทักษ์ และ ฉันทนา อินทจันทร์  
 การเตรียมและการศึกษาลักษณะของไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิก  
 ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2548 27(5) : 1103-1112

ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิก (AAm/MA) ซึ่งมีการพองตัวในน้ำได้สูง เตรียมได้โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระในน้ำของอะคริลาไมด์กับกรดมาเลอิกซึ่งเป็นมอนอเมอร์และโคมอนอเมอร์ โดยใช้ระบบตัวริเริ่มโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต (KPS) และเตตระเมทิลเอทิลีนไดเอมีน (TEMED) และใช้ ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) และ N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ ศึกษาส่วนประกอบต่างๆ ของอะคริลาไมด์ กรดมาเลอิกและปริมาณตัวเชื่อมโยงพันธะ หากการพองตัวในน้ำปริมาณน้ำสมดุลและกำลังการพองตัวของไฮโดรเจลที่ได้ จากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลพองตัวในน้ำอยู่ในช่วง 8,420-10,300% และ 31,60-3560%, ค่าปริมาณน้ำสมดุลในน้ำของไฮโดรเจลอยู่ในช่วง 0.9880-0.9902 และ 0.9630-0.9727 และค่ากำลังการพองตัวของไฮโดรเจลอยู่ในช่วง 84-103 และ 31-36 เมื่อใช้ 1%EGDMA และ 1%MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะตามลำดับตามค่ากำลังการพองตัวที่ได้แสดงให้เห็นว่าการแพร่ของน้ำเข้าไปในไฮโดรเจลเป็นลักษณะ non-Fickian

ไฮโดรเจลพอลิเมอร์ดูดน้ำ (superabsorbent polymer hydrogels) เป็นพอลิเมอร์โครงสร้างตาข่ายที่ชอบน้ำ (crosslinked hydrophilic polymer) ซึ่งสามารถดูดน้ำได้สูงถึง 1,000 เท่าของน้ำหนักพอลิเมอร์แห้ง (Omidian *et al.*, 1998) พอลิเมอร์โครงสร้างตาข่ายเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ 1 ชนิด หรือมากกว่า 1 ชนิด หรือเกิดจากการรวมตัวของพันธะ เช่น พันธะไฮโดรเจนและอันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ (Brannon-Peppas, 1990) ไฮโดรเจลจัดเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ (sensor) เยื่อเลือกผ่าน (separation membrane) สารดูดซับ (adsorbent) วัสดุทางการแพทย์ ทางเภสัชกรรมและใช้ในการแก้ปัญหาทางระบบนิเวศวิทยาและปัญหาทางชีววิทยา ตลอดจนทางด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่ (Brannon-Peppas, 1990, Karadag and Saraydin, 2002)

พอลิเมอร์ดูดน้ำสูงสามารถเตรียมได้จากอะคริลาไมด์และกรดอะคริลิก (หรือเกลืออะคริเลท) โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายโดยใช้ระบบตัวริเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์ (Liu and Rempell, 1997; Karadag and Saraydin, 2002) หรือโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอยผ่นกลับ (inverse suspension polymerization) (Omidian *et al.*, 1998, Krull *et al.*, 2002)

หรือเตรียมจากเกลืออะคริเลทอย่างเดี่ยวโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอยผ่นกลับ (Askari *et al.*, 1993, Omidian *et al.*, 1994) ใช้โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต (หรือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยานอกจากนี้ต้องใช้ตัวเชื่อมโยงพันธะ (crosslinker) ชนิดต่างๆ ได้แก่ N,N'-methylenebisacrylamide, ethylene glycol dimethacrylate, 1,4-butanediol dimethacrylate และ trimethylolpropane triacrylate เป็นต้น Raju Padmana และ Raju Mohana (2001) ได้ศึกษาการเตรียมโคพอลิเมอร์โครงสร้างตาข่ายสูตรต่างๆ จากอะคริลาไมด์ กรดอะคริลิก อะคริโลไนไตรล์ กรดเมทาคริลิก โซเดียมอะคริเลท และ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลท ใช้ N,N'-methylenebisacrylamide เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ พบว่าโคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากอะคริลาไมด์ โซเดียมอะคริเลท และ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลทมีการพองตัวในน้ำได้สูงสุด 400 กรัม/กรัมของพอลิเมอร์ ส่วนไฮโดรเจลอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น เตรียมจากอะคริลาไมด์ โซเดียมเมทาอัลลิลซัลโฟเนทและโซเดียมอะคริเลทโดยใช้ N,N'-methylenebisacrylamide เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ ได้พอลิเมอร์ที่มีความสามารถดูดน้ำได้ 125 เท่าของน้ำหนักพอลิเมอร์แห้ง (Zhou *et al.*, 1998)

ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกอาจเตรียมจากอะคริลาไมด์ กรดมาเลอิกและน้ำโดยการฉายด้วยรังสีแกมมา

( $\gamma$ -radiation) ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกที่ได้พองตัวในน้ำอยู่ในช่วง 1,000-2,800% พฤติกรรมการแพร่ของน้ำในไฮโดรเจลดังกล่าวเป็นแบบ non-Fickian (Saraydin *et al.*, 1995) นอกจากนี้ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิก สามารถเตรียมได้จากอะคริลาไมด์และกรดมาเลอิกโดยใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในสารละลายและใช้ตัวเชื่อมโยงพันธะ คือ trimethylolpropane triacrylate และ 1,4-butanediol dimethacrylate ไฮโดรเจลที่ได้มีการพองตัวในน้ำอยู่ในช่วง 1,660-6,050% ค่าปริมาณน้ำสมดุล (equilibrium water content) อยู่ในช่วง 0.8873-0.9837 และการแพร่ของน้ำเข้าไปในไฮโดรเจลเป็นลักษณะ non-Fickian type ในขณะที่เดียวกันก็ได้นำไฮโดรเจลชนิดนี้ไปศึกษาการดูดซับสีที่มีประจุบวก คือ Basic Blue 17 (Toluidin Blue) อีกด้วย (Karadag *et al.*, 2002) นอกจากนี้ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกหลายชนิดที่เตรียมขึ้นเพื่อประโยชน์ในการเป็นสารควบคุมการปลดปล่อยสารประกอบที่ว่องไวทางชีวภาพมักจะทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายโดยใช้รังสีแกมมา (Tumturk *et al.*, 1999; Arslan *et al.*, 2000; Sen *et al.*, 2000; Saraydin *et al.*, 2001)

เนื่องจากยังไม่มีรายงานการวิจัยการเตรียมไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกโดยใช้ ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) และ N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมาก่อน มีแต่ใช้ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) และ 1,4-butanediol dimethacrylate (BDMA) เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ การที่เลือกใช้ EGDMA และ MBA ในงานวิจัยนี้ เพราะว่ามีการใช้สารทั้งสองในการเตรียมพอลิเมอร์ดูดน้ำสูง (superabsorbent polymer) ในโคพอลิเมอร์ระหว่างอะคริลาไมด์กับไซเตียมอะคริเลท จึงคาดว่าถ้านำมาใช้กับชนิดของไฮโดรเจลในงานวิจัยก็จะได้พอลิเมอร์ที่มีการพองตัวได้สูงเช่นเดียวกัน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเตรียมและศึกษาสมบัติการพองตัวและลักษณะการดูดซับของไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกโดยใช้โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต และ N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine เป็นระบบตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) และ N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) เพื่อให้ได้วัสดุพอลิเมอร์ที่เป็น

แนวทางนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารบางชนิดและทำอุปกรณ์ทางการแพทย์ต่อไป

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

### 1. วัสดุและอุปกรณ์

Potassium persulfate (KPS) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ผลิตโดยบริษัท Fluka Chimie, acrylamide (AAM) เป็นมอนอเมอร์ ผลิตโดยบริษัท Fluka Chimie, maleic Acid (MA) เป็นโคมอนอเมอร์ผลิตโดยบริษัท Fluka Chimie, N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TEMED) เป็นตัวเร่งร่วม (activator) ผลิตโดยบริษัท Aldrich, N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ (crosslinker) ผลิตโดยบริษัท Aldrich, ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ (crosslinker) ผลิตโดยบริษัท Fluka

### 2. การเตรียมไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิก (Preparation of AAM/MA hydrogel)

เตรียมไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิก (AAM/MA) โดยละลายอะคริลาไมด์ (AAM) 1 กรัม ในน้ำที่ผ่านการกลั่น 2 ครั้งปริมาตร 1 มล. ในบีกเกอร์ แล้วเติมกรดมาเลอิก (MA) 20, 40, 60, 80, 100 หรือ 500 มล. ลงในสารละลายอะคริลาไมด์ ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวเชื่อมโยงพันธะโดยการเติมสารละลาย 1% ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) หรือสารละลาย 1% N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) ปริมาตร 0.25 มล. ในสารละลายอะคริลาไมด์และกรดมาเลอิก เติมสารละลาย 2% potassium persulfate (KPS) ปริมาตร 0.2 มล. เพื่อเป็นตัวริเริ่มและเติมสารละลาย 1% N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TEMED) ปริมาตร 0.25 มล. ลงในสารละลาย จากนั้นจึงเทสารละลายที่ได้ลงในหลอดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ซึ่งทำหน้าที่เป็นปฏิกรณ์ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization reactor) ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไฮโดรเจลที่ได้ออกจากหลอดแล้วตัดให้มีขนาด 3-4 มม. แล้วนำไฮโดรเจลไป

อบให้แห้ง

t คือ เวลา

K คือ ค่าคงที่ของการพองตัว

n คือ เลขยกกำลังของการพองตัว

### 3. การวัดการพองตัว (Swelling measurement)

#### 3.1 การพองตัวในน้ำ (Water swelling)

หาค่าการพองตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมได้โดยการนำไฮโดรเจลที่แห้งประมาณ 0.1 กรัม แช่ในน้ำที่ผ่านการกลั่น 2 ครั้ง ปริมาตร 50 มล. วางไว้ที่อุณหภูมิห้อง ( $27 \pm 1^\circ\text{C}$ ) กรองด้วยตะแกรงและซับน้ำที่อยู่บริเวณผิวด้านนอกออก จากนั้นชั่งน้ำหนักของเจลที่พองตัวที่เวลาใดๆ

ร้อยละการพองตัว (%S) หาได้จากสูตรดังนี้ (Karadag and Saraydin, 2002)

$$\%S = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100$$

เมื่อ  $M_t$  คือ มวล (กรัม) ของเจลที่เวลาใดๆ

$M_0$  คือ มวล (กรัม) ของเจลแห้งที่เวลา 0

#### 3.2 ปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium water content)

การพองตัวของไฮโดรเจลอีกพารามิเตอร์หนึ่ง คือ ปริมาณน้ำสมดุล (equilibrium water content, EWC) หาได้จากสูตรดังนี้ (Karadag and Saraydin, 2002)

$$\text{EWC} = \frac{M_s - M_0}{M_s}$$

เมื่อ  $M_s$  คือ มวลของเจล (กรัม) ที่พองตัวที่เวลาใดๆ (จุดสมดุล)

$M_0$  คือ มวลของเจล (กรัม) แห้งที่เวลา 0

#### 3.3 กำลังการพองตัว (Swelling power)

กลไกการพองตัวของไฮโดรเจลสามารถหาได้จากสมการดังนี้ (Karadag and Saraydin, 2002)

$$F_{\text{swp}} = \frac{M_t - M_n}{M_n} = Kt^n$$

เมื่อ  $F_{\text{swp}}$  คือ ค่ากำลังการพองตัว (Swelling Power)

$M_t$  คือ มวล (กรัม) ของเจลที่เวลาใดๆ

$M_0$  คือ มวล (กรัม) ของเจลแห้ง

เขียนกราฟระหว่าง  $\ln(F_{\text{swp}})$  กับ  $\ln t$  และคำนวณหาค่า n ได้จากความชันของกราฟแต่ละเส้น สำหรับรูปร่างแบบทรงกระบอก n มีค่าเท่ากับ 0.45-0.5 ในกรณีการแพร่แบบ Fickian type และค่า  $0.5 < n < 1.0$  ในกรณีการแพร่แบบ non-Fickian type

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 1. การเตรียมไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเล็ก

ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเล็กที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ โดยใช้อะคริลาไมด์ 1 กรัมละลายในน้ำกลั่น 1 มล. กับกรดมาเล็ก 20, 40, 60, 80, 100 หรือ 500 มก. ใช้ตัวเชื่อมโยงพันธะคือ สารละลาย 1%MBA หรือ 1%EGDMA ปริมาตร 0.25 มล. สารละลาย 2%KPS 0.2 มล. และสารละลาย 1% TEMED 0.25 มล. ในขั้นตอนแรกของปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันนั้น KPS เข้าทำปฏิกิริยากับ TEMED ทำให้โมเลกุลของ TEMED มีอิเล็กตรอนขาดคู่ (unpaired valence electron) จึงสามารถเข้ารวมตัวกับอะคริลาไมด์และกรดมาเล็ก หรือตัวเชื่อมโยงพันธะ ในกระบวนการนี้ อะคริลาไมด์ หรือกรดมาเล็กโมเลกุลอื่นๆ สามารถเข้ามาเกาะและมีความว่องไวในการทำงานเดียวกัน ทำให้โคพอลิเมอไรเซชันของอะคริลาไมด์และกรดมาเล็กยาวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โมเลกุลของตัวเชื่อมโยงพันธะก็สามารถเข้าไปในสายโซ่ของพอลิเมอไรเซชันแล้วเกิดโครงสร้างตาข่าย (Tanaka, 1981) ไฮโดรเจลที่ได้มีลักษณะรูปทรงกระบอก ก่อนแช่น้ำมีลักษณะแข็งมาก แต่เมื่อแช่น้ำจะพองตัวขึ้น มีลักษณะอ่อนนุ่มและมีความยืดหยุ่นดี (Figure 1)

#### 2. การวัดการพองตัว

##### 2.1 ผลของปริมาณกรดมาเล็กต่อการพองตัวของไฮโดรเจล

จากการนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากอะคริลาไมด์และกรดมาเล็กที่ปริมาณต่างๆ มาศึกษาการพองตัว

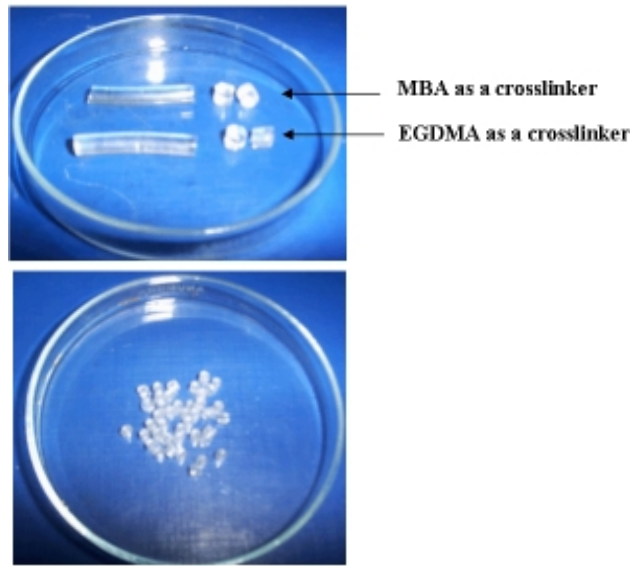


Figure 1. AAm/MA hydrogels prepared using MBA and EGDMA as crosslinkers (A) fresh hydrogels (B) dried hydrogels.

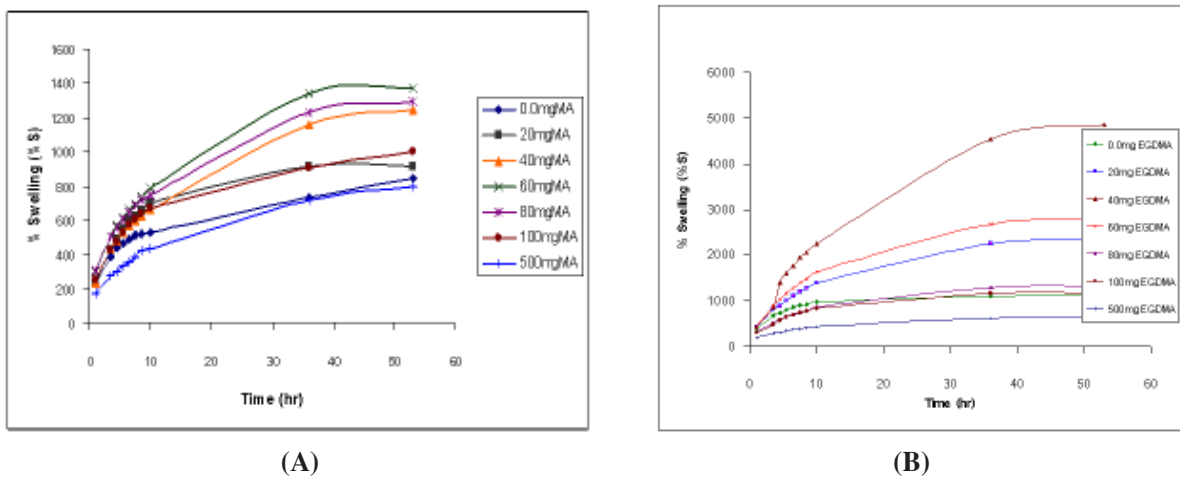
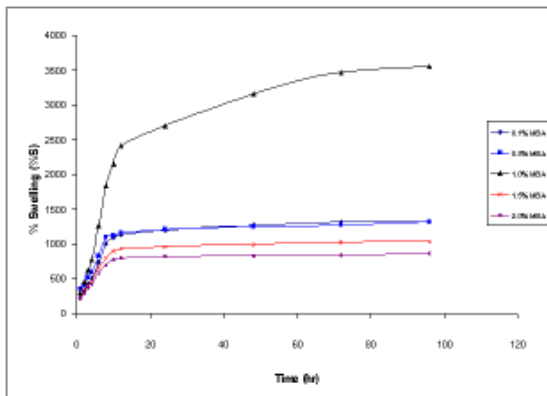


Figure 2. Variation of water swelling as function of time of AAm/MA hydrogels at various concentration of maleic acid (A) MBA as a crosslinker (B) EGDMA as a crosslinker.

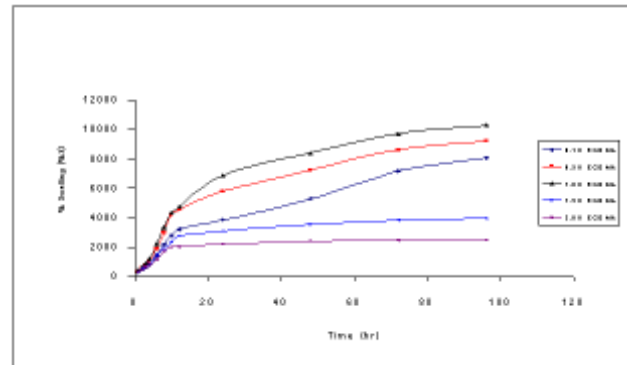
ในน้ำ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการพองตัวของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นจนถึงคงที่ในที่สุด ความสัมพันธ์ระหว่างการพองตัวของไฮโดรเจลเมื่อแปรปริมาณต่างๆ ของกรดมาเลอิกแสดงใน Figure 2

จาก Figure 2 พบว่าการพองตัวของไฮโดรเจลเริ่มสมดุลที่เวลา 36 ชั่วโมง มีการพองตัวได้ดีที่สุด คือ

1,340% และ 4,545% เมื่อใช้สัดส่วนอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกเท่ากับ 1 กรัม/60 มก. และเท่ากับ 1 กรัม/40 มก. เมื่อใช้ 1%MBA และ 1%EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะตามลำดับ การที่ใช้ EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะแล้วทำให้ไฮโดรเจลพองตัวในน้ำได้ดีกว่า MBA เพราะว่า EGDMA มีความยาวของสายโซ่มากกว่า ทำให้

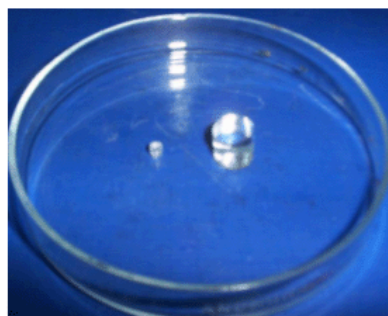


(A)

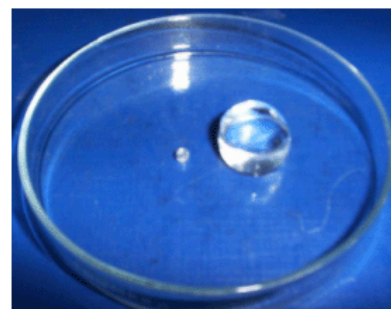


(B)

Figure 3. Variation of water swelling (%S) as function of time of AAm/MA hydrogels at various concentrations of maleic acid using (A) MBA as a crosslinker and (B) EGDMA as a crosslinker.



(A)



(B)

Figure 4. Swelled AAm/MA hydrogels in water  
(A) MBA as a crosslinker  
(B) EGDMA as a crosslinker

โครงสร้างตาข่ายของไฮโดรเจลมีพื้นที่ในการแพร่ของน้ำเข้าไปได้มากกว่า สำหรับไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกซึ่งเตรียมโดยใช้ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) และ 1,4-butane dimethylacrylate (BDMA) เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะให้ผลในทำนองเดียวกับกรณีใช้ MBA คือ ไฮโดรเจลพองตัวในน้ำได้ดีที่สุดเมื่อใช้สัดส่วนอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกเท่ากับ 1 กรัม/60 มก. (Karadag *et al.*, 2002)

ด้วยเหตุนี้จึงนำสัดส่วนนี้มาเตรียมไฮโดรเจลโดยการแปรค่าความเข้มข้นของตัวเชื่อมข้ามพันธะจาก 1.0% เป็น 0.1%, 0.5%, 1.5% และ 2.0%

## 2.2 ผลของปริมาณตัวเชื่อมโยงพันธะต่อการพองตัวของไฮโดรเจล

จากการศึกษาการพองตัวของไฮโดรเจลที่พองตัวได้ดีที่สุดในข้อ 2.1 มาแปรปริมาณของ MBA และ EGDMA พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การพองตัวก็เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ในที่สุด (Figure 3)

จาก Figure 3 พบว่าในช่วงเวลาเกิดปริมาณน้ำสมมูล (ชั่วโมงที่ 48-96) ไฮโดรเจลมีการพองตัวได้ดีอยู่ในช่วง 3,160-3,560% และ 8,420-10,300% เมื่อใช้ 1% MBA และ 1%EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะตามลำดับการที่ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกที่ได้จากการใช้

EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีการพองตัวได้มากกว่าไฮโดรเจลที่ใช้ MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ (Figure 4) เป็นเพราะว่าสายโซ่ของ EGDMA ซึ่งเชื่อมโยงระหว่าง 2 สายโซ่อยู่ห่างกันมากกว่าทำให้มีช่องว่างอุ้มน้ำได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกเมื่อใช้ TMPTA และ BDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีการพองตัวในน้ำอยู่ในช่วง 780-1,360% และ 1,660-6,050 ตามลำดับ (Karadag *et al.*, 2002)

### 3. ผลของปริมาณน้ำสมดุล

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวเชื่อมโยงพันธะต่อการพองตัวในน้ำของไฮโดรเจล ค่าปริมาณน้ำสมดุล (EWC) ในช่วงของไฮโดรเจลที่ใช้ 1%MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ มีการพองตัวได้ดีที่สุดในช่วง 3,160-3,560% พบว่ามีค่า EWC ดีที่สุดเช่นเดียวกันคือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.9693-0.9727 ส่วนไฮโดรเจลที่มี 1%EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ มีการพองตัวดีที่สุดในช่วง 8,420-10,300% ก็มีค่า EWC ดีที่สุดเช่นเดียวกันคือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.9880-0.9902 (Table 1) ค่า EWC ที่ได้ทั้งสองกรณีสอดคล้องกับงานที่อื่น (Karadag and Saradin,

2002) ที่ใช้ BDMA และ TMPTA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะและมีค่าปริมาณน้ำสมดุล 0.8873-0.9837 เราสามารถกล่าวได้ว่าไฮโดรเจล AAm/MA นี้สามารถใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์ทางการแพทย์ เภสัชกรรม สัตวศาสตร์ ที่ต้องสัมผัสกับของเหลวที่อยู่ในร่างกายของมนุษย์ และประยุกต์ใช้ด้านอื่นๆ เช่น ใช้เป็นสารดูดน้ำ เป็นต้น (Karadag and Saraydin, 2002; Karadag *et al.*, 2002)

### 4. ผลการหาค่ากำลังการพองตัว (Swelling power, $F_{swp}$ )

จากการนำไฮโดรเจลแห้งที่ได้ซึ่งแข็งและใสคล้ายแก้วไปแช่น้ำ น้ำจะแพร่เข้าไปในไฮโดรเจลและทำให้ไฮโดรเจลพองตัวขึ้น การแพร่ของน้ำเกี่ยวข้องกับกลไกการเคลื่อนย้ายของน้ำเข้าไปในช่องว่างระหว่างสายโซ่ของไฮโดรเจลจากการคำนวณหาค่ากำลังการพองตัวของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลที่ใช้สารละลาย 1%MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีค่ากำลังการพองตัว ( $F_{swp}$ ) มากที่สุดเช่นเดียวกัน คือมีค่าอยู่ระหว่าง 31-36 ส่วนไฮโดรเจลที่มีสารละลาย 1%EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะก็มีค่ากำลังการพองตัว ( $F_{swp}$ ) มากที่สุดเช่นเดียวกันคือ มีค่าอยู่ระหว่าง 84-103 การหาค่ากำลังการพองตัวของไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้

**Table 1. Equilibrium water content (EWC) of AAm/MA hydrogel in water.**

Crosslinkers	Crosslinker concentration (%)				
	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0
MBA	0.9300	0.9289	0.9727	0.9114	0.8959
EGDMA	0.9875	0.9896	0.9902	0.9753	0.9614

**Table 2. Swelling exponents (n) and swelling constants (K) of AAm/MA hydrogel in water.**

Crosslinkers	Crosslinker concentration (%)				
	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0
<b>Swelling exponents (n)</b>					
MBA	0.3893	0.3025	0.5627	0.3293	0.3091
EGDMA	0.7396	0.7583	0.7411	0.5349	0.4709
<b>Swelling constants (K)</b>					
MBA	1.126	1.428	1.437	1.110	1.012
EGDMA	1.242	1.460	1.634	1.530	1.448

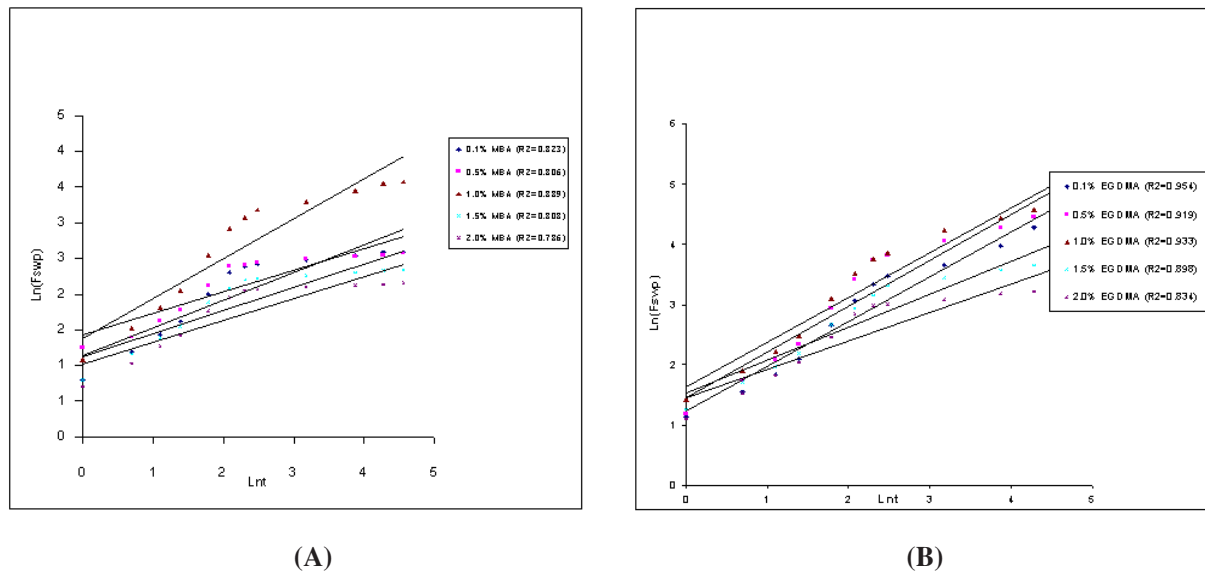


Figure 5. Variation of  $\ln(F_{swp})$  with  $\ln t$  of AAm/MA hydrogels at various concentrations of (A) MBA (B) EGDMA.

1%EGDMA สูงกว่าเมื่อใช้ 1%MBA สามารถยืนยันได้ว่าการที่มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้สูงกว่าเป็นเพราะว่าน้ำแพร่เข้าไปในไฮโดรเจลได้เร็วกว่า

และจากการนำค่า  $F_{swp}$  มาเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(F_{swp})$  กับ  $\ln t$  (Figure 5) ค่าเลขยกกำลังของการแพร่ (n) ของไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟ ไฮโดรเจลที่ใช้ 1%MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีค่า n เท่ากับ 0.5627 ส่วนไฮโดรเจลที่ใช้ 1%EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีค่า n เท่ากับ 0.7411 (Table 2) จะเห็นได้ว่าตัวเลขที่บ่งบอกประเภทของการแพร่ (n) ที่หาได้ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 0.50 ดังนั้นการแพร่ของไฮโดรเจลที่มีการพองตัวมากกว่า 3,000% จึงเป็นแบบ non-Fickian type

โครงสร้างของไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิก โดยใช้ KPS กับ TEMED เป็นระบบตัวริเริ่มปฏิกริยานั้น ปฏิกริยาขั้นตอนแรก KPS ทำให้โมเลกุล TEMED เกิดอิเล็กตรอนขาดคู่ และสามารถเข้าร่วมตัวกับโมเลกุลของอะคริลาไมด์และกรดมาเลอิก หรือตัวเชื่อมโยงพันธะ (MBA และ EGDMA) ในกระบวนการนี้ อิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนไปให้แก่หน่วยมอนอเมอร์ ทำให้โมเลกุลว่องไวขึ้น ทำให้โคพอลิเมอร์อะคริลาไมด์และกรดมาเลอิกยาวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

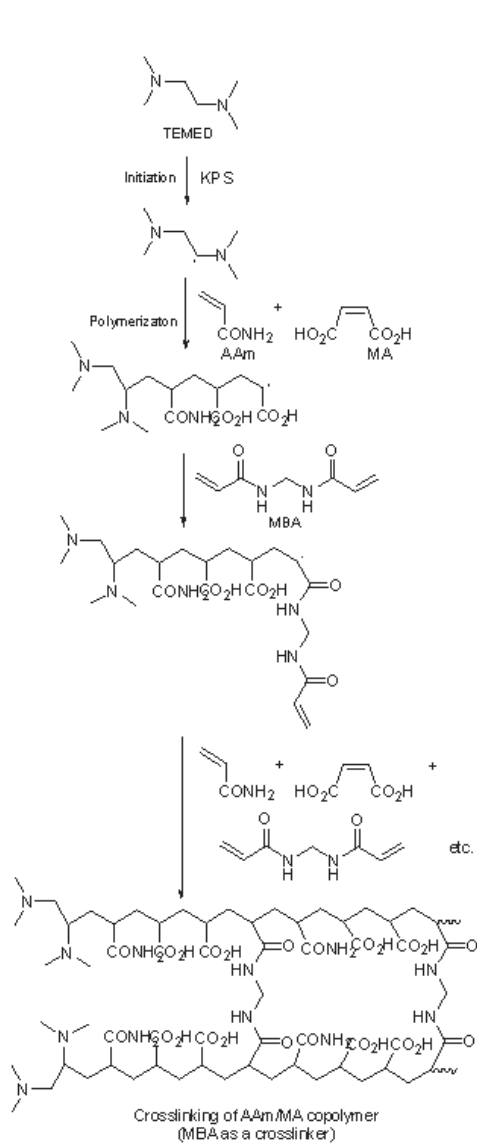
เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย (Tanaka, 1981) กลไกปฏิกริยาที่คาดว่าเป็นไปได้แสดงใน Figure 6 และ Figure 7

สรุป

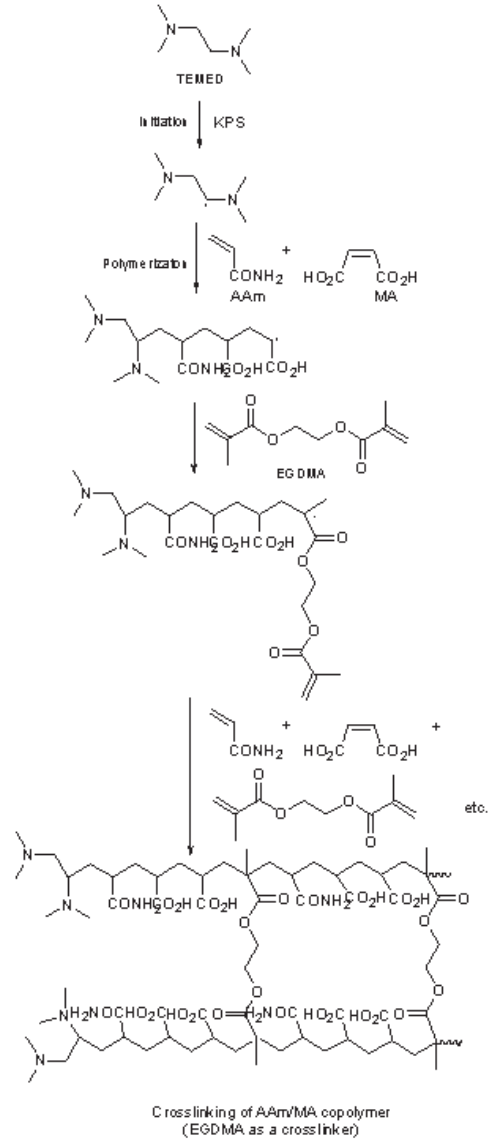
ไฮโดรเจลอะคริลาไมด์/กรดมาเลอิกเตรียมโดยปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระในสารละลายอะคริลาไมด์และกรดมาเลอิก โดยใช้สารละลาย 1%MBA และ 1%EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ และใช้ KPS และ TEMED เป็นระบบตัวริเริ่มปฏิกริยา

ไฮโดรเจลที่ใช้ EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีการพองตัวมากกว่าไฮโดรเจลที่มี MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ โดยไฮโดรเจลที่มี 1%EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะ มีการพองตัวอยู่ในช่วง 8,420-10,300% ส่วนไฮโดรเจลที่มี 1%MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีการพองตัวอยู่ในช่วง 3,160-3,560% ค่าปริมาณน้ำสมดุลของไฮโดรเจลที่มี 1%EGDMA และ 1%MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะมีค่าปริมาณน้ำสมดุลอยู่ในช่วง 0.9880-0.9902 และ 0.9630-0.9727 ตามลำดับ ในขณะที่งานวิจัยอื่นซึ่งใช้ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) และ 1,4-butanediol dimethacrylate (BDMA) เป็นตัว





**Figure 6. Possible mechanism for formation of hydrogel using KPS and TEMED as an initiator system in the presence of MBA as a crosslinker.**



**Figure 7. Possible mechanism for formation of hydrogel using KPS and TEMED as an initiator system in the presence of EGDMA as a crosslinker.**

เชื่อมโยงพันธะมีค่าการพองตัวอยู่ในช่วง 1,660-6,050% และปริมาณน้ำสมดุลอยู่ในช่วง 0.8873-0.9837%

ไฮโดรเจลมีค่า  $F_{swp}$  อยู่ในช่วง 84-103 และ 31-36 เมื่อใช้ 1%EGDMA และ 1%MBA เป็นตัวเชื่อมโยงพันธะตามลำดับ ไฮโดรเจลที่มีการพองตัวมากกว่า 3,000% ขึ้นไปมีแพร่แบบ non-Fickian type ส่วนไฮโดรเจลที่มี

การแพร่ของน้ำน้อยกว่า 3,000% ไม่สามารถสรุปชนิดของการแพร่ได้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนปัจจัยเกี่ยวพันต่างๆ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์

#### เอกสารอ้างอิง

- Arslan, F., Tumor, H., Caykara, T. and Sen, M. 2000. The effect of gel composition on the adsorption of invertase on poly(acrylamide/maleic acid) hydrogels. *Food Chemistry*, 70: 33-38.
- Askari, F., Nafisi, S., Omidian, H. and Hashimi, S.A. 1993. Synthesis and characterization of acrylic based superabsorbents. *J. Appl. Polym. Sci.*, 50: 1851-1855.
- Brannon-Peppas, L. 1990. Preparation and characterization of crosslinked hydrophilic networks. In *Absorbent Polymer Technology*, edited by Brannon-Peppas, L. and Harland, R.S. Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands. 45-66.
- Karadag, E., Baris Uzum, O. and Saraydin, D. 2002. Swelling equilibria and dye adsorption studies of chemically crosslinked superabsorbent acrylamide/maleic acid hydrogels. *Eur. Polym. J.*, 38: 2133-2141.
- Karadag, E. and Saraydin, D. 2002. Swelling of superabsorbent acrylamide/sodium acrylate hydrogels using multifunctional crosslinkers. *Turk. J. Chem.*, 26: 863-875.
- Krull, L.P., Nareiko E.I., Matusевич, V. and Seiber, W. 2002. Water superabsorbent based on copolymer of acrylamide with sodium acrylate. *Polymer Bulletin*, 45: 165-195.
- Lui, Z.S. and Rempel, G.L. 1997. Preparation of superabsorbent polymer by crosslinking acrylic acid and acrylamide copolymer. *J. Appl. Polym. Sci.*, 64: 1345-1353.
- Omidian, H., Hasemi, A., Askari, F. and Nafisi, S. 1994. Modification acrylic-based superabsorbent. I. Modification of crosslinker and comonomer nature. *J. Appl. Polym. Sci.*, 54: 241-249.
- Omidian, H., Hasemi, A., Sammes, P.G. and Meldrum, I. 1998. A model for the swelling of superabsorbent polymers. *Polymer*, 39(26): 6697-6704.
- Raju Padmanabha, M. and Raju Mohana, K. 2001. Design and synthesis of superabsorbent polymer. *J. Appl. Polym. Sci.*, 80: 2635-2639.
- Saraydin, D., Karadag, E., Caldiran, Y. and Guvan, O. 2001. Nicotine-selective radiation-induced poly (acrylamide/maleic acid) hydrogels. *Rad. Phy. Chem.*, 60: 302-210.
- Saraydin, D., Karadag, E. and Guvan, O. 1995. Acrylamide/maleic acid hydrogel. *Polym. Adv. Technol.*, 6 : 719-726.
- Saraydin, D., Karadag, E. and Guvan, O. 2001. Swelling properties of copolymeric hydrogels prepared by gamma irradiation. *J. Appl. Polym. Sci.*, 79: 1809-1815.
- Sen, M., Uzun, C. and Guven, O. 2000. Controlled release of terbinafine hydrochloride from pH sensitive poly(acrylamide/maleic acid) hydrogels. *Inter. J. Phar.* 203: 149-157.
- Tanaka, T. 1981. Gels. *Scientific American*, January: 124-138.
- Tumor, H., Caykara, T., Sen, M. and Guen, O. 1999. Adsorption of  $\alpha$ -amylase onto poly(acrylamide/maleic acid) hydrogels. *Rad. Phy. Chem.*, 55: 713-716.
- Zhou, W.J., Yao, K.J. and Kurth, M.J. 1997. Studies on crosslinked poly(AM-MSAS-AA) gels. II. Effects of polymerization conditions on the water absorbency. *J. Appl. Polym. Sci.*, 64: 1009-1014.