

## บทที่ 4

### วิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาพอลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งมีทั้งชนิดที่มี cross-linked ได้แก่ polyacrylamide gel และ Carbopol 940 gel ชนิดที่ไม่มี cross-linked ได้แก่ polyacrylamide gel ที่ไม่มี N, N'-methylene-bis-acrylamide และพอลิเมอร์ชีวภาพ ได้แก่ kappa-carrageenan sodium alginate และ gelatin โดยพอลิเมอร์ดังกล่าวข้างต้นจะมีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางแสงเปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย และ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ( pH ) เป็นต้น เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางแสงได้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

#### 4.1 พอลิเมอร์ ที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทางแสง

การวิจัยครั้งนี้ได้เริ่มการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพที่สำคัญในงานวิจัย คือ ความใส โดยศึกษาจาก การวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับความยาวคลื่น 400 - 700 nm เมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกลั่น จากผลการทดลองพบว่า 5 % polyacrylamide gel 1.5% Carbopol 940 gel และ 1.5% gelatine จะมีค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับความยาวคลื่น 400 - 700 nm สูงกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกลั่น ส่วน 1.5% kappa - carrageenan และ 1.5% sodium alginate จะมีค่าการดูดกลืนแสง ที่ระดับความยาวคลื่น 400 - 700 nm สูงมาก เมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกลั่น อย่างไรก็ตาม 1.5% gelatine ไม่มีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า ส่วน sodium alginate มีความขุ่นสูง จึงมิได้นำพอลิเมอร์ทั้ง 2 มาศึกษาต่อ ฉะนั้น kappa - carrageenan จึงเป็นตัวแทนของพอลิเมอร์ชีวภาพในการนำมาศึกษาต่อเพราะ kappa - carrageenan มีลักษณะโครงสร้างที่ประกอบด้วย กลุ่ม sulfate ester ซึ่งเป็น ประจุลบอยู่ในโครงสร้าง และ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า จะมีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ส่วน 5.0% polyacrylamide gel และ 1.5% Carbopol 940 gel ประกอบด้วย carboxylic group (COOH) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นประจุลบ\* เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า จะมีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เช่นเดียวกับ kappa - carrageenan ใน polyacrylamide gel จะประกอบด้วยสารหลักคือ acrylamide และ N, N'-methylene - bis - acrylamide แต่เมื่อนำมาคิยัตราส่วนโดยโมลของ acrylamide : N, N'-methylene - bis - acrylamide มีค่าเท่ากับ 1 : 0.01 จึงไม่นำส่วนของ N, N'-methylene - bis - acrylamide มาคิด ฉะนั้น % acrylic acid residue ที่เพิ่มขึ้นจึงคิดจาก acrylamide อย่างเดียว ส่วน kappa - carrageenan และ Carbopol 940 gel จะเป็นพอลิเมอร์เจล ที่มีโครงสร้างเป็นประจุลบอยู่แล้วจึงไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ 3 ชนิด ที่กล่าวข้างต้นที่จะนำมาศึกษาต่อ

โดยนำ cross - linked polyacrylamide gel ที่เตรียมได้ ทั้งชนิดก่อนหน้าตัดกลม และ เม็ด polyacrylamide gel ที่มีไว้ cross - linked Carbopol 940 gel และ kappa - carrageenan มาทำการศึกษาลักษณะที่เปลี่ยนแปลงโดยอาศัยปัจจัยภายนอก (external factor) ได้แก่ การเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ ของพอลิเมอร์ เนื่องจากค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ของ ตัวทำละลายออร์แกนิก - น้ำที่ระดับความเข้มข้นต่างๆเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนค่าความเป็นกรด - ด่างของพอลิเมอร์เนื่องจากค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายบัฟเฟอร์เปลี่ยนแปลงไป และระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า

## 4.2 การเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ เมื่อแช่ในตัวกลางที่มีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ ต่างๆกัน

จากการทดลองพบว่า ท่อน polyacrylamide gel ที่ได้รับการ cross - linked และมี acrylic acid residue 0% จากข้อ 3.3.1 เมื่อนำพอลิเมอร์มาแช่ใน ตัวทำละลายออร์แกนิก - น้ำที่มีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ ต่างๆกันจะมีผลให้ไม่เกิดการบวมตัว เนื่องจากไม่มีแรงผลักระหว่างประจุที่เหมือนกันมาผลักดัน ทำให้ ท่อน polyacrylamide gel เกิดการบวมตัว แต่จะเกิดการยุบตัว

---

\*ประจุลบของ polyacrylamide gel เกิดจากการนำ polyacrylamide gel ไปแช่ใน 0.4% TEMED pH 12.0 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก acrylamide residue (CONH<sub>2</sub>) ไปเป็น acrylic acid residue (COOH ↔ COO<sup>-</sup>) ซึ่งการเปลี่ยน จะเกิดตรงบริเวณ aminocarbonyl group ของ acrylamide

ที่เนื่องจากแรง polymer - polymer affinity ซึ่งเป็นแรงดูดที่อยู่บนสายพอลิเมอร์ และ แรง rubber - elasticity มาทำให้เกิดการยุบตัว ส่วน polyacrylamide gel ที่มี acrylic acid residue ต่าง ๆ กัน

เมื่อนำไปแช่สารผสมอะซิโตน - น้ำ 20 และ 40% ที่มีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ เท่ากับ 68.6 และ 56.0 ตามลำดับ และแช่ในสารผสมเอทานอล - น้ำ 20 และ 40% ที่มีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ เท่ากับ 68.7 และ 56.5 ตามลำดับ ( Meites ,1963 ) ซึ่งมีผลทำให้แรงดูด หรือ แรงผลักร (F) น้อย จึงทำให้แรง polymer - polymer affinity ซึ่งเป็นแรงดูดที่อยู่บนสายพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นแรงดูดๆกันได้ไม่มากนักเพราะสายพอลิเมอร์อยู่ห่างกัน และ แรงเนื่องจาก rubber elasticity ก็น้อยด้วย แต่จะบวมตัวเนื่องจากมีแรงเนื่องจากประจุที่เหมือนกัน ผลักกันทำให้เจลบวมตัว และ เมื่อนำไปแช่ในสารผสมอะซิโตน - น้ำ 60 80 100% ที่มีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ เท่ากับ 42.9 30.3 และ 20.7 ตามลำดับ และแช่ในสารผสมเอทานอล - น้ำ 60 80 และ 100% ที่มีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ เท่ากับ 44.7 33.9 และ 24.3 ตามลำดับ ( Meites , 1963 ) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ ที่น้อยเมื่อเทียบกับมีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์ ของสารผสมอะซิโตน - น้ำ 20 และ 40% ซึ่งมีผลทำให้แรงดูด หรือ แรงผลักรมาก จึงทำให้จะมีแรงเนื่องจาก rubber elasticity จะต้องใช้ในการดึงให้เจลยุบตัว แรง polymer - polymer affinity ซึ่งเป็นแรงดูด และ แรงเนื่องจาก  $H^+$  ซึ่งเป็นแรงผลักรก็จะมีมากเช่นกัน แต่แรง polymer - polymer affinity จะมีมากเพราะแรง แวน เดอ วาลส์ (แรง polymer - polymer affinity) สามารถเกิดได้กับอะตอมทุกคู่ ซึ่งในการทดลองจะทำการศึกษา polyacrylamide gel ทั้งแบบท่อน และเม็ดไปพร้อมๆ กัน ผลที่ได้ออกมาจะคล้ายกัน ต่างกันตรงแบบเม็ดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วกว่าแบบท่อน เนื่องจากแบบเม็ดจะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับสารละลาย สูงกว่าแบบท่อนจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วกว่า แต่อาจจะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการทำเป็นอุปกรณ์ทางแสง เพราะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเหมือนกับการทดลองของ Tanaka แต่ Tanaka จะทดลองเฉพาะที่เป็นแบบท่อน แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาทั้งแบบท่อน และเม็ด ส่วน kappa - carrageenan เมื่อนำไปแช่ในตัวทำละลายออร์แกนิก - น้ำ ที่ 20 และ 40% จะพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เพราะ kappa - carrageenan เป็นพอลิเมอร์ ที่มีประจุลบบนโครงสร้างเพื่ออาศัยประจุลบที่ผลักรกันทำให้ kappa - carrageenan คงสภาพเป็นเจลซึ่งเป็นการบวมตัวที่เดิมที่ แต่เมื่อนำไปแช่ในตัวทำละลายออร์แกนิก - น้ำ 60 80 และ 100 % จะเกิดการยุบตัวเช่นเดียวกับ polyacrylamide gel ที่มี acrylic acid residue ต่าง ๆ กัน ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งการยุบตัวของ 1.5 % kappa - carrageenan จะยุบตัวน้อยกว่าที่ระดับความเข้มข้น 4.0% เพราะการเพิ่มความเข้มข้นจะมีผลทำให้ประจุในสารเพิ่มมากขึ้น ตาม ส่วน 1% 5% และ 10 % polyacrylamide gel ที่มีได้ cross - linked และ 1.5 % Carbopol 940 gel มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง และ 1.5 % Carbopol 940 gel จะมี

ลักษณะนี้ และ จะ ฉะนั้นเมื่อบรรจุลงในหลอดแก้ว และวัดปลายหลอดแก้วด้วย dialysis tubing แล้วนำไปแช่ในตัวทำละลายออร์แกนิก - น้ำ เมื่อเปิด dialysis tubing จะมีส่วนของ 1.5 % Carbopol 940 gel และ polyacrylamide gel บางส่วนจะติดมากับ dialysis tubing จึงทำให้ผลการศึกษาการบวมตัวและการยุบตัวของ polymer ที่ได้ออกมามีตัวเลขที่ไม่แน่นอน ในการทดลองนี้ใช้ ตัวทำละลายออร์แกนิก 2 ชนิด คือ อะซิโตน และ เอทานอล แต่ เอทานอลจะมีผลทำให้พอลิเมอร์ บวมตัว น้อยกว่า อะซิโตน เนื่องจาก เอทานอลมีค่าไดอิเล็กตริก คอนสแตนต์สูงกว่า เอทานอล ทำให้แรงดึงดูด หรือ แรงผลัก (F) น้อย

### 4.3 การเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ เมื่อแช่ในตัวกลางที่มีค่าความเป็นกรด - ด่าง ต่างๆกัน

เมื่อนำ polyacrylamide gel ที่ได้รับการ cross - linked และมี acrylic acid residue 0 % คือ polyacrylamide gel ที่ไม่มีประจุอยู่ในโครงสร้าง เมื่อนำพอลิเมอร์ไปแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ ที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง 2.25 3.25 4.25 5.25 และ 6.25 พบว่าไม่มีการบวมตัวหรือยุบตัว เนื่องจาก polyacrylamide gel ที่ไม่มีประจุในโครงสร้างจะไม่มีการแตกตัวของประจุ ส่วน polyacrylamide gel ที่มี acrylic acid residue ต่าง ๆกัน จะมีประจุลบอยู่ในโครงสร้างโดยประจุลบที่เหมือนกันผลักกันจน polyacrylamide gel บวมตัว ฉะนั้นเมื่อนำไปแช่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด - ด่าง 2.25 3.25 4.25 5.25 และ 6.25 จะมีผลทำให้ polyacrylamide gel เกิดการยุบตัวเนื่องจาก  $H^+$  ( $H^+$  pressure) เข้าไปจับกับโครงสร้างที่มีประจุลบ ( $COO^-$ ) ของ polyacrylamide gel ทำให้กลายเป็นไม่มีประจุ ( $COOH$ ) พบว่าที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง 6.25 จะมีการยุบตัวน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับค่าความเป็นกรด - ด่าง อื่น เพราะที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง 6.25 จะมี  $H^+$  น้อยสุด จึงทำให้  $H^+$  จะเข้าไปจับกับ  $COO^-$  แล้วกลายเป็น  $COOH$  ซึ่งไม่มีประจุน้อยที่สุด จึงมีผลให้  $COO^-$  เหลืออยู่ในโครงสร้างมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง อื่น จึงทำให้ polyacrylamide gel เกิดการยุบตัวน้อยที่สุด

ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) เท่ากับค่า  $pK+2(6.25)$   $pK+1(5.25)$   $pK(4.25)$   $pK-1(3.25)$  และ  $pK-2(2.25)$  ฉะนั้นที่ pH มากกว่า pK จะพบว่า polyacrylamide gel จะบวมตัว และที่ pH น้อยกว่า pK จะพบว่า polyacrylamide gel จะยุบตัว

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ ที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง เนื่องจากสารละลายบัฟเฟอร์เป็นสารละลายที่เตรียมได้จากกรดอ่อนผสมกับเกลือของกรดนั้น หรือเบสอ่อนผสมกับ

เกลือของเบสหนัก (กฤษณา ชูติมา, 2536) และจะไม่เปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่างมากนัก เมื่อเติมกรดแก่หรือเบสแก่เล็กน้อย จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับ polyacrylamide gel ที่ถูกแช่ใน สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด - ด่าง 12.0 เพราะเมื่อนำมาแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีคุณสมบัติ ดังกล่าวก็จะไม่ทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายบัฟเฟอร์เปลี่ยนแปลงมากนัก

ส่วน kappa - carrageenan เมื่อนำไปแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง 2.25 และ 3.25 พบว่า kappa - carrageenan จะยุบตัว แต่ที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง 4.25 5.25 และ 6.25 พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง การยุบตัวของ kappa - carrageenan จะยุบตัวใกล้เคียงกันหมด ทุกความเข้มข้น ส่วน 1 5 และ 10 % polyacrylamide gel ที่มีได้ cross - linked และ 1.5 % Carbopol 940 gel จะได้ตัวเลขที่ไม่แน่นอนอน ดังที่ได้กล่าวข้างต้น

## 4.4 การเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ในสนามไฟฟ้า

### 4.4.1 การบวม-ยุบตัวของพอลิเมอร์ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

นำ polyacrylamide gel ที่มี acrylic acid residue 21.5 % แช่ในน้ำกลั่นหรือ 50% สารผสม อะซิโตน - น้ำ แล้วผ่านสนามไฟฟ้า 2 4 6 8 และ 10 v/cm ที่ความต่างศักย์ 5 10 15 20 และ 25 volts โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จะมีผลทำให้ electrode ขั้วลบผลักรับประจุลบของ polyacrylamide gel แรงที่ผลักรับจะผลักเอาเนื้อ polyacrylamide gel (Tanaka, 1982) ไปทาง ด้าน electrode ขั้วบวก ทำให้ polyacrylamide gel ด้านขั้วบวกเกิดการบวมตัวและด้านขั้วลบเกิดการ ยุบตัว ซึ่งความจริงแล้ว polyacrylamide gel ด้านขั้วบวกจะต้องยุบตัว เนื่องจากประจุบวก และ ลบ ดูดกัน แต่เนื่องจากขั้วบวก หรือ ขั้วที่ขาดแคลนอิเล็กตรอน อิออนลบจึงให้อิเล็กตรอน แก่ขั้วนั้น เราเรียกปฏิกิริยานี้ว่า oxidation (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2536) ซึ่งจากการที่ electrode ขั้วบวกเกิดการ oxidize มีผลให้เกิดการเกาะของเกลือ ซึ่งจะขวางทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าทำให้การ เคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเกิดได้น้อย ในการทดลองนี้ polyacrylamide gel ที่แช่ในน้ำกลั่นจะยุบตัว ทางด้านลบ และบวมตัวทางด้านบวกมากกว่า polyacrylamide gel ที่แช่ใน 50 % สารละลายผสม อะซิโตน - น้ำ เพราะจากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ พบว่ากระแสไฟฟ้า สามารถไหลผ่านตัวต้านทานในที่นี้คือ น้ำกลั่น ได้ดีกว่า สารผสมอะซิโตน - น้ำ เนื่องจากน้ำเป็นตัว นำไฟฟ้าที่ดี (ชวิน เป้าอารีย์, 2520) และเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อย่างอ่อน ที่สามารถแตกตัว เป็นไอออนแล้วยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ (กฤษณา ชูติมา, 2536) ถ้าศึกษาจากค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านตัวต้านทานทั้งสอง จะเห็นว่าสารละลายอะซิโตนแทบจะไม่นำไฟฟ้าเลยเมื่อเทียบกับ ในน้ำ แต่อัตราส่วนการบวมตัวของ polyacrylamide gel ในตัวต้านทานทั้งสองมิได้ต่างกันมาก

เพราะ polyacrylamide gel จะมีจุดวิกฤต (critical point) ระหว่าง การบวมตัว และ การยุบตัวที่ระดับความเข้มข้น ใน 47 % สารผสมอะซิโตน - น้ำ (Tanaka, 1981) ฉะนั้นในการทดลองนี้จะใช้ที่ระดับความเข้มข้น ใน 50 % สารผสมอะซิโตน - น้ำ เพื่อจะได้ช่วยในการทำให้ polyacrylamide gel เกิดการยุบตัว ส่วน kappa - carrageenan นั้นถึงแม้มีโครงสร้างเป็นประจุลบ ( $SO_3^-$ ) อยู่ภายในโครงสร้างแต่จะไม่ยอมยุบหรือบวมตัวได้มากเท่ากับท่อน polyacrylamide gel ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดในเรื่องของประจุภายในโครงสร้างของ kappa - carrageenan ซึ่งมีประจุแคพอที่จะคงสภาพในการเป็นเจลได้เท่านั้น ส่วน polyacrylamide ที่มีได้ cross - linked นั้นมีลักษณะเป็นของเหลวที่หนืด และ 1.5% Carbopol 940 gel ถึงแม้ว่าจะไม่เป็นของเหลวแต่ก็ไม่แข็งตัวเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ ถ้าหากนำไปแช่ในน้ำ หรือ 50% สารผสมอะซิโตน - น้ำ ก็จะศึกษาได้ลำบาก เนื่องจากทั้ง polyacrylamide ที่มีได้ cross - linked และ 1.5% Carbopol 940 gel มีลักษณะใสมาจากข้อ

3.1.1

#### 4.4.2 การเบนตัวของพอลิเมอร์ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

เมื่อนำท่อน polyacrylamide gel ที่มี acrylic acid residue 21.5% จะมีโครงสร้างเป็นประจุลบ ผ่านสนามไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 2.7 5.41 8.11 10.81 และ 13.51 v/cm เมื่อวาง electrode ขั้วบวกและลบ ห่างจากท่อน polyacrylamide gel ประมาณ 0.5 เซนติเมตร และผ่านสนามไฟฟ้า 1.75 3.51 5.26 7.02 และ 8.77 v/cm เมื่อวาง electrode ขั้วบวกและลบ ห่างจากท่อน polyacrylamide gel ประมาณ 1.0 เซนติเมตร พบว่าทางด้าน electrode ขั้วลบจะผลัดกับประจุลบของ polyacrylamide gel มีผลให้เกิดการดันของเนื้อ polyacrylamide gel ทำให้ยุบตัว ส่วนทางด้าน electrode ขั้วบวกจะดูดกับประจุลบของ polyacrylamide gel ทำให้บวมตัว แต่การบวมหรือยุบตัวจะเกิดในบริเวณที่มี electrode วางอยู่เท่านั้น polyacrylamide gel บริเวณที่มีได้ถูกตรึงจะมีการสั่นไหวทำให้เกิดการเบนตัวของท่อน polyacrylamide gel ไปทางขั้วลบ (Yuk-SH, 1993) เนื่องจาก polyacrylamide gel ด้านลบถูกผลัดไปทางด้านบวกแต่จะผลัดเฉพาะในบริเวณที่มี electrode วางอยู่เท่านั้น จึงทำให้ polyacrylamide gel บริเวณ ที่มีได้ถูกตรึงจะมีการสั่นไหวทำให้เกิดการเบนตัวและเมื่อสลับขั้ว electrode จากบวกมาเป็นลบและลบมาเป็นบวกพบว่า จะมีการเบนตัวกลับของปลายท่อน polyacrylamide gel ไปทางด้านลบเช่นเดียวกับที่กล่าวข้างต้น แต่ค่าเฉลี่ยการเบนตัวกลับจะสูงกว่าค่าเฉลี่ยการเบนตัวไป เนื่องจากแรง rubber elasticity ซึ่งจะเกิดในกรณีที่เกิดการเคลื่อนที่ของสายพอลิเมอร์ โดยแรงนี้จะพยายามที่จะทำให้ พอลิเมอร์ กลับสู่สภาพเดิม ในการทดลองจะมีวาง electrode ขั้วบวกและลบ ห่างจากท่อน polyacrylamide gel ประมาณ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร พบว่า electrode ที่วางห่างจากท่อน polyacrylamide gel 1.0 เซนติเมตร จะเบนตัวได้น้อยกว่า electrode ที่วางห่างจากท่อน polyacrylamide gel 0.5 เซนติเมตร เนื่อง

จากระยะห่างซึ่งมากความเข้มของสนามไฟฟ้า ก็จะยิ่งน้อยทำให้ประจุไฟฟ้าจึงต้องใช้เวลามากขึ้นกว่าจะไปถึง ท่อน polyacrylamide gel จากการทดลองพบว่าองค์ที่เบนจะเป็นปฏิภาคตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า

#### 4.4.3 การบวม-ยุบตัวและเบนตัวของพอลิเมอร์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ

(AC)

ในการทดลองการบวมตัว และการเบนตัว จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกาะของเกลือที่ electrode ขั้วบวก แต่ผลที่ได้คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จะมีการสลับไป - มาของขั้วทำให้ปรากฏภายในท่อน polyacrylamide gel เคลื่อนที่กลับไป-มา อาจจะทำให้ไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

### 4.5 การทดสอบสมบัติการรวมหรือกระจายแสงของท่อนพอลิเมอร์ในสนามไฟฟ้า

เมื่อนำ ท่อน polyacrylamide gel ที่เบนตัวมาทดสอบสมบัติทางแสงโดยฉายแสงเลเซอร์ผ่าน ท่อน polyacrylamide gel ที่ถูกตรึงไว้ 3 แบบ คือ ขนาดท่อนสั้นตรงปลายไว้ด้านหนึ่ง ขนาดท่อนสั้นตรงตรงกลาง และขนาดท่อนยาวตรงปลายทั้ง 2 ด้าน พบว่า เมื่อฉายแสงผ่านภาชนะ ที่มีท่อน polyacrylamide gel จะมีการกระเจิงของแสงที่เกิดจากท่อน polyacrylamide gel เองทำให้ลำแสงเกิดการหักเหประมาณ 2 องศา และเมื่อนำมาผ่านสนามไฟฟ้าจะมีการเบนตัวของท่อน polyacrylamide gel ซึ่งเกิดเบนตัวของท่อน polyacrylamide gel จะเป็นปฏิภาคตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า นำแสงเลเซอร์มาฉายผ่านท่อน polyacrylamide gel ที่เบนตัวพบว่า ลำแสงที่ผ่านท่อน polyacrylamide gel จะเกิดการหักเหเป็นผลมาจากความโค้งงอของท่อน polyacrylamide gel เองและเกิดจากความโค้งงอของท่อน polyacrylamide gel ที่เกิดจากความเข้มของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการหักเหของลำแสง ซึ่งเป็นความคลาดวงกลม ที่เป็นความคลาดชนิดเด็วที่เกิดในงานวิจัยนี้ เพราะความคลาดวงกลม จะเกิดเมื่อวัตถุอยู่บนแกนมุขสำคัญ ในการทดลองนี้ polyacrylamide gel มีค่าดัชนีหักเหแสง เท่ากับ 1.338 ซึ่งใกล้เคียงกัน กับค่าดัชนีหักเหแสงของน้ำที่มีค่าเท่ากับ 1.330 ฉะนั้นความคลาดที่เกิดจากค่าดัชนีหักเหแสงเปลี่ยนแปลงจึงมีน้อย ในการทดลองได้นำท่อน polyacrylamide gel ที่มีการตรึงไว้ 3 แบบ คือ ขนาดท่อนสั้นตรงปลายไว้ด้านหนึ่ง ขนาดท่อนสั้นตรงตรงกลาง และขนาดท่อนยาวตรงปลายทั้ง 2 ด้าน ที่เบนตัว มาฉายแสงเลเซอร์ผ่าน ผลที่ได้คือ ลำแสงที่ผ่าน polyacrylamide gel บริเวณที่เบนตัวจะเกิดการหักเหเนื่องจาก ความโค้งงอของท่อน polyacrylamide gel ซึ่งการหักเหจะมีทั้งแบบหักเหเข้าหาจุดโฟกัส และออกจากจุดโฟกัส

ขึ้นกับความโค้งของท่อน polyacrylamide gel ว่าโค้งเข้าหรือ ออกจากจุดโฟกัส ไม่เหมือนกับเลนส์นูน หรือ เลนส์เว้าที่อาศัยความหนา - บาง ในการทำให้เกิดการรวม หรือ กระจายแสง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับท่อน polyacrylamide gel ขนาดท่อนสั้นตรงปลายไว้ด้านหนึ่ง ขนาดท่อนสั้นตรงตรงกลาง ที่มีการเบนตัวใกล้เคียงกันพบว่า ขนาดท่อนสั้นตรงปลายไว้ด้านหนึ่ง จะมีทางยาวโฟกัสมากกว่า ขนาดท่อนสั้นตรงตรงกลาง เนื่องจาก ขนาดท่อนสั้นตรงปลายไว้ด้านหนึ่งจะมีส่วนของด้านล่างของท่อน polyacrylamide gel ที่มีได้เกิดการโค้งงอ ไม่เหมือนกับแบบขนาดท่อนสั้นตรงตรงกลาง ที่มีการโค้งงอ ตลอดทั้งท่อน polyacrylamide gel จึงทำให้ลำแสงของขนาดท่อนสั้นตรงตรงกลางที่มีความโค้งด้านปลายเกิดการหักเหเข้า - ออกทั้ง 2 ปลาย ตามลักษณะความโค้ง ในของเลนส์ โดยเฉพาะในกรณีลำแสง ไปตัดกันจริง หรือ จุดนี้อยู่ทางฝั่งตรงกันข้ามกับแหล่งกำเนิดแสง เราเรียกว่า จุดโฟกัสจริง (real focal point) เราให้ค่าทางยาวโฟกัสมีค่าเป็นบวก แต่ในกรณีลำแสง ข้อนไปตัดกันทางด้านเดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสง เราเรียกจุดนี้ว่า จุดโฟกัสเสมือน (virtual focal point) เราให้ค่าทางยาวโฟกัสมีค่าเป็นลบ และขนาดท่อนยาวตรงปลายทั้ง 2 ด้าน พบว่าลำแสงที่อยู่ใกล้แกนमुखสำคัญ จะมีให้ค่าทางยาวโฟกัสน้อยกว่าลำแสงอยู่ไกลแกนमुखสำคัญ ซึ่งอาจเกิดจากบริเวณใกล้แกนमुखสำคัญ จะโค้งงอมากกว่า บริเวณไกลแกนमुखสำคัญ จึงทำให้การหักเหของลำแสงมาก - น้อยตามความโค้งงอของท่อน polyacrylamide gel

#### 4.6 การทดลองสร้างพอลิเมอร์ที่ควบคุมทางยาวโฟกัสได้

เมื่อนำแผ่น polyacrylamide gel มาทดลองทำเป็นเลนส์ ผลที่ได้คือ จะเหมือนกับแบบท่อนคือจะมีหุบ - บานของลำแสง เหมือนกับการหักเห เข้า - ออก เหมือนกับแบบท่อน แต่ไม่สามารถวัดค่าทางยาวโฟกัสได้แน่นอน เนื่องจาก ภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีบริเวณตรงกลางของภาวะเป็นวง ทำให้เมื่อฉายแสงผ่าน ภาวะจะเกิดการหักเหแสง

#### 4.7 การทดลองสร้างเม็ด polyacrylamide gel

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังมีได้มีการศึกษา polyacrylamide gel ในรูปแบบที่เป็นเม็ดจึงได้ทำการศึกษาโดยใช้ตัวแปร 3 ตัวแปรในการทำการทดลอง ได้แก่ ร้อยละของ polyacrylamide gel ระยะเวลาความเข้มข้นของสารผสม และความเร็วรอบในการปั่น เนื่องจากในการทดลองนี้มิได้ตั้งขนาดเม็ดที่ต้องการไว้ เพียงแต่ต้องการขนาดเม็ดที่เล็ก และ เกาะตัวกันน้อยสุด จากผลการทดลอง พบว่า 20 เปอร์เซ็นต์ polyacrylamide gel ปั่นในน้ำมันพืช ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบ / นาที จะได้เม็ด polyacrylamide gel ที่มีขนาดเล็กมากที่สุด เพราะน้ำมันพืชเป็นสารที่

มีความหนืดสูงจึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าสารละลายที่มีความหนืดต่ำ ( มนตรี จุฬาวังนกุล, 2531 ) ทำให้ polyacrylamide gel ที่ถูกปั่นด้วยความเร็วรอบ 1200 รอบ / นาที มีโอกาสกลับเข้าไปรวมตัวกันเป็นเม็ดใหญ่ได้ช้ากว่า ในสารละลายที่มีความหนืดต่ำ และที่ระดับความเข้มข้น 20 % polyacrylamide gel จะแข็งตัวมากที่สุด และใช้เวลาในการแข็งตัวประมาณ 3-4 นาที ซึ่งใช้เวลาน้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่น และ ผลจากการที่แข็งตัวได้เร็วจึงทำให้เม็ด polyacrylamide gel มีโอกาสเข้าไปรวมตัวกันได้น้อย จึงได้เม็ดที่มีขนาดเล็กมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นอื่น โดยดูจากการนำเอาเม็ด polyacrylamide gel ไปวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง mastersizer optical measurement unit เมื่อนำไปคำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัด\* โดยสมมุติให้เม็ด polyacrylamide gel มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2  $\mu\text{m}$  จะได้อัตรา ส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อน polyacrylamide gel ต่อเม็ด polyacrylamide gel มีค่าเท่ากับ  $1:5.6 \times 10^5$  พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น จะทำให้สารละลายสามารถแพร่เข้า - ออกจากเจลได้เร็วขึ้น ซึ่งอัตราการแพร่ ขึ้นกับ ความเข้มข้น และ ระยะทาง ( Roberta, 1975 ) ในการทดลองนี้มิได้เปลี่ยนความเข้มข้น แต่ระยะทางในการแพร่จะเปลี่ยนเนื่องจาก polyacrylamide gel แบบท่อนมีระยะทางในการแพร่ให้เข้าไปถึง ภายในเนื้อเจลมากกว่าแบบเม็ด แต่ในโครงการวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงการแพร่ เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วกว่าที่จะหาเทคนิคที่เหมาะสมมาทำการศึกษาได้

นอกจากนี้เม็ด polyacrylamide gel ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ เช่น กล้ามเนื้อเทียม ( Yuk - SH and Lee - SH, 1993 ) ได้ในอนาคต

---

\* คำนวณโดยใช้สูตรการหาจำนวนเม็ดที่มีค่าเท่ากับปริมาตรที่เป็นท่อน / ปริมาตรที่เป็นเม็ด (  $\pi r^2 h / 4/3 \pi r^3$  ) นำจำนวนเม็ดที่คำนวณได้มาคูณกับพื้นที่ผิวที่เป็นเม็ด (  $4\pi r^2$  ) จะมีค่าเท่ากับปริมาตรที่เป็นเม็ดนำปริมาตรที่เป็นเม็ด มาคิดเป็นอัตราส่วน โดยเทียบกับปริมาตรที่เป็นท่อน (  $2\pi r^2 + 2\pi rh$  ) จะได้เป็นอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อน polyacrylamide gel ต่อเม็ด polyacrylamide gel