บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

อะคริลาไมด์ เป็นสารประกอบอะลิฟาติกเอไมด์ที่มีพิษต่อระบบประสาท (Dearfield *et al.*, 1988; Tilson & Cabe, 1979) และมีรายงานยืนยันว่ามีแนวโน้มสูงที่จะเป็นสารก่อมะเร็งในคน (IARC, 1994; Segerback *et al.*, 1995; Tareke *et al.*, 2000) เมื่อคนได้รับอะคริลาไมด์เข้าไป จะเกิดความผิดปกติที่ระบบประสาทสันหลังส่วนกลางและระบบประสาทรอบนอก (Klaasen & Doull, 1986; Shanker & Seth, 1986; Tilson, 1981) โดยพิษของอะคริลาไมด์เชื่อว่าเกิดจากสารตัวกลางชื่อ ไกล์ซิดาไมด์ ที่ได้จากกระบวนการสลายอะคริลาไมด์ภายในเซลล์ เข้าจับกับดีเอ็นเอและทำลายรหัสพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต (Svensson *et al.*, 2003; Tareke *et al.*, 2000)

ในสภาวะโดยทั่วไป สารอะคริลาไมด์มีสถานะเป็นของแข็งโมเลกุลเดี่ยวที่มีสีอ่อนจนถึงสีขาวที่อยู่ในรูปของผลึกที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง สามารถละลายได้ดีในน้ำหรือตัวทำละลายที่มีขั้ว เนื่องจากสารอะคริลาไมด์มีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลเดี่ยว จึงทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่น (Polymerization) เมื่อถูกหลอมเหลวหรืออยู่ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต อย่างไรก็ตาม สารอะคริลาไมด์สามารถซึมผ่านผิวหนัง เยื่อหุ้มที่มีลักษณะเป็นเมือก (Mucous membranes) ได้แก่ ปอดหรือทางเดินอาหารของสิ่งมีชีวิตได้อย่างรวดเร็ว (Klaasen & Doull, 1986; Merck, 1989) เคยมีรายงานว่า พบสารอะคริลาไมด์ตกค้างในร่างกายของคนงานมากกว่าสองหมื่นคนที่ทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้อะคริลาไมด์เป็นสารเคมีในกระบวนการผลิต คาดว่าการตกค้างของสารอะคริลาไมด์นั้น เกิดจากการสัมผัสหรือสูดไอระเหยของสารอะคริลาไมด์เข้าไปในระบบทางเดินหายใจโดยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ (Howard, 1989; IARC, 1986; Kirk-Othmer, 1978) มีรายงานพบว่า เมื่อคนและสัตว์ได้รับสารอะคริลาไมด์เข้าไป จะเกิดความผิดปกติที่ระบบประสาทสันหลังส่วนกลางและระบบประสาทรอบนอก (Klaasen & Doull, 1986; Shanker & Seth, 1986; Tilson, 1981) รวมทั้งส่งผลทำให้เกิดความผิดปกติต่อการแบ่งเซลล์ในระยะไมโตติก (Mitotic) และไมโอติก (Meiotic) ของสัตว์และพืชบางชนิดอีกด้วย (Shairashi, 1978; Shanker *et al.*, 1987)

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน สารอะคริลาไมด์เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมน้ำมัน การผลิตกระดาษ หมึกพิมพ์ เครื่องสำอาง และการทำคอนแทคเลนส์ (Kirk-Othmer, 1978; Kirk-Othmer, 1979; Sax & Lewis, 1987; Sittig, 1985) นิยมใช้สารอะคริลาไมด์ในปฏิกิริยาที่ต้องการการสังเคราะห์โพลิเมอร์ (Polymer) หรือการผลิตพลาสติก โดยเป็นสารที่ช่วยในการโพลิเมอร์ไรส์ (Polymerizing agent) ตัวประสาน (Grouting agent) สารช่วยเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) การทำแข็ง (Hardener) การทำความ

หนา (Thickener) และสารช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Strengthener) หรือใช้ในรูปของโพลีเมอร์ที่รู้จักกันดี คือ โพลีอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงงานน้ำมัน (Prasad, 1982) เนื่องจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้ในแต่ละปีมีการใช้สารอะคริลาไมด์มากกว่าสองแสนตัน (Nagasawa & Yamada, 1989) จากการใช้อย่างแพร่หลายและไม่มีการควบคุมหรือกำจัดสารอะคริลาไมด์อย่างดีพอ จึงทำให้มีการปนเปื้อนของสารอะคริลาไมด์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปริมาณสูงถึงร้อยละ 5-0.3 ทำให้เกิดการตกค้างของสารอะคริลาไมด์ในสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป สิ่งแวดล้อมทางทะเล รวมทั้งในระบบนิเวศของพืช (Cherry *et al.*, 1956; Croll *et al.*, 1974; Igisu *et al.*, 1975)

ในอดีตมีรายงานการค้นพบจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถย่อยสลายสารกลุ่มเอไมด์ได้ ทั้งกลุ่มอะลิฟาติก (Aliphatic) และกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic) (Friedrick & Mitrenga, 1981; Grant & Wilson 1973; Hynes & Pateman, 1970; Kagayama & Ohe, 1990) แต่สำหรับสารอะคริลาไมด์นั้น ยังไม่ค่อยมีการค้นพบจุลินทรีย์ที่สามารถใช้อะคริลาไมด์เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเจริญมากนัก ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากผลกระทบของสารอะคริลาไมด์ที่มีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์กลูทาไทโอนเอส-ทรานส์เฟอเรส (Glutathione-s-transferase) ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกำจัดสารพิษภายในเซลล์ (Detoxication) โดยการเข้าจับกับหมู่ซัลไฮดริล (Sulfhydryl group) ของเอนไซม์ดังกล่าว (Dixit *et al.*, 1980) ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ (Cavins & Friedman, 1968) ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้วิธีการกำจัดการตกค้างของสารอะคริลาไมด์ในอดีตทำได้เพียงแค่การโพลีเมอร์ไรส์อะคริลาไมด์ให้เป็นโพลีอะคริลาไมด์ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีพิษ แต่จากข้อจำกัดของปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชั่นที่ต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติมที่มีราคาแพง เช่น แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulphate) และทีเมด (*N, N, N', N'*-Tetramethylenediamine; TEMED) สำหรับให้อนุมูลอิสระในการเริ่มต้นของปฏิกิริยาและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชั่น ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบปัญหาการโพลีเมอร์ไรส์ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete polymerization) ของสารอะคริลาไมด์และการสลายได้เองของโพลีอะคริลาไมด์เป็นอะคริลาไมด์อีกครั้งเมื่อถูกความร้อนหรือแสง (Smith *et al.*, 1996) จากปัญหาดังกล่าว กระตุ้นให้นักวิจัยหันกลับมาสนใจศึกษาการกำจัดอะคริลาไมด์โดยใช้จุลินทรีย์บำบัด (Bioremediation) อีกครั้ง เพราะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีราคาไม่แพง

จุลินทรีย์ที่สามารถใช้ประโยชน์จากอะคริลาไมด์เป็นแหล่งพลังงานและสารอาหารในการเจริญนั้น มีการค้นพบครั้งแรกจากตัวอย่างน้ำในแม่น้ำและดิน (Brown *et al.*, 1982; Cherry *et al.*, 1956; Croll *et al.*, 1974; Lande *et al.*, 1979) แต่ไม่ได้มีการคัดเลือกและจำแนกสายพันธุ์อย่างแน่นอน จนกระทั่งในปีค.ศ. 1982 Asano และคณะฯ ได้ทำการคัดเลือก *Pseudomonas chlororaphis* B23 จากตัวอย่างดินที่มีการปนเปื้อนของอะคริลาไมด์ ทำให้หลังจากนั้นได้มีการค้นพบและศึกษาคุณสมบัติในการสลายสารอะคริลาไมด์ของแบคทีเรียชนิดต่างๆ หลากหลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นใน *Rhodococcus rhodocrhous* J1, *P. stutzeri*, *Xanthomonas maltophilia*, *R.*

erythropolis, *Rhodopseudomonas palustris* (Hirrlinger *et al.*, 1996; Nagasawa & Yamada, 1989; Nawaz *et al.*, 1993; Nawaz *et al.*, 1994; Shanker *et al.*, 1990; Wang & Lee, 2001; Wampler & Ensign, 2005; Zabaznaya *et al.*, 1998)

กลไกการสลายอะคริลาไมด์เริ่มต้นโดยอาศัยปฏิกิริยาดีอะมิเดชั่น (Deamidation) จากการทำงานของเอนไซม์อะมิเดส (Amidase) หรือที่รู้จักกันดีว่าเอนไซม์อะมิโดไฮโดรเลส (Amidohydrolase; EC 3.5.1.4) เปลี่ยนอะคริลาไมด์เป็นแอมโมเนียและกรดอะคริลิก (Acrylic acid) หรือที่รู้จักในชื่ออะคริเลต (Acrylate) (Nawaz *et al.*, 1998, Nawaz *et al.*, 1994, Shanker *et al.*, 1990, และ Sluis *et al.*, 2002) ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีพิษน้อยลงและไม่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (Verschueren, 1977) ที่จะถูกสลายต่อไปโดยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสลายอะคริเลต (Acrylate catabolism) ที่มีอยู่เองในเซลล์ของจุลินทรีย์นั้น เช่น เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซีเลชั่น (Hydroxylation) เป็นบีตา-ไฮดรอกซีโพไพโอเนท (β-hydroxypropionate) ที่จะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) เป็นโพรไพโอเนท (Propionate) โดยการทำงานของเอนไซม์กลุ่มอะคริลิกเอซิดรีดักเทส (Acrylic acid reductase) เป็นต้น (จิตติมา เจริญพานิช, 2551; Wampler & Ensign, 2005)

ปัจจุบันในหลายประเทศ มีการประยุกต์ใช้เอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ ในการสลายสารตกค้างจากกระบวนการอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้เวลาไม่นานและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในภายหลัง สำหรับการกำจัดอะคริลาไมด์เคยมีรายงานเช่นกันถึงการนำเอนไซม์อะมิเดสบริสุทธิ์มาใช้ในการบำบัด อะคริลาไมด์ที่ตกค้างในถังพักน้ำของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม (Nawaz *et al.*, 1993; Nawaz *et al.*, 1998; Prabu & Thatheyus, 2007; Wang & Lee, 2001) เช่นงานวิจัยของ Nagasawa และ Yamada (1989) ที่นำเอนไซม์อะมิเดสบริสุทธิ์ จากเซลล์แบคทีเรียที่ใช้อะคริลาไมด์ในการเจริญมาล้างพิษอะคริลาไมด์และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพในกระบวนการผลิตกรดอะคิลิกในระดับปริมาณมาก หรืองานวิจัยของ Shanker และคณะ ในปี 1990 ที่แยก *Pseudomonas* sp. ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram-negative bacteria) รูปแท่งขนาดเล็ก (Short rod) เคลื่อนที่ได้ (Motile) และต้องการอากาศในการเจริญ (Aerobic) จากดินในสวนเขตร้อนโดยวิธีการบำรุง (Enrichment) ในอาหารที่มีอะคริลาไมด์ โดยพบว่าแบคทีเรียสามารถสลายอะคริลาไมด์ได้ถึง 4 กรัมต่อลิตร เป็นกรดอะคริลิคและแอมโมเนียเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนในการเจริญ โดยใช้เอนไซม์อะมิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะคริลาไมด์ ซึ่งจะทำงานได้ดีในเอไมด์สายสั้น (Short chain amides) ได้แก่ ฟอร์มาไมด์ (Formamide) อะซีตาไมด์ (Acetamide) แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอนุพันธ์ของอะคริลาไมด์ (Acrylamide analogues) เช่น เมทาคริลาไมด์ (Methacrylamide) และบิสอะคริลาไมด์ (*N,N*-Methylene bisacrylamide) ความสามารถของเอนไซม์จะถูกกดดัน (Repression) ได้โดยซักซิเนท (Succinate) ในสภาวะที่มีและไม่มีแหล่งไนโตรเจน

หรือในปีค.ศ. 1993 Nawaz และคณะ ทำการแยก *Pseudomonas* และ *X.maltophilia* และประยุกต์ใช้เซลล์ตรึงหรือ เอนไซม์อะมิเดส ที่ผลิตจากเชื้อเหล่านี้ ในการสลายการปนเปื้อนของอะคริลาไมด์ และต่อมาในปี 1994 คณะผู้วิจัยเดียวกันทำการแยก *Rhodococcus* ที่ใช้อะคริลาไมด์เป็นสารตั้งต้นในการเจริญ จากดินที่มีการเจือปนของยาฆ่าแมลง และทำบริสุทธิ์รวมทั้งศึกษาลักษณะเฉพาะของเอนไซม์อะมิเดสบริสุทธิ์ที่ได้ พบว่ามีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 360 กิโลดอลตัน ที่ประกอบด้วยแปดหน่วยย่อย (Subunit) สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์คือ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 8.5 มีค่า pI (Isoelectric point) ที่ pH 4.0 เอนไซม์มีความจำเพาะสูงกับ อะคริลาไมด์ และ อะซีตาไมด์ (Acetamide) นอกจากนี้ยังพบว่า ในโมเลกุลของเอนไซม์ประกอบด้วยเหล็กแปดโมล แอคติวิตีของเอนไซม์ถูกยับยั้งได้โดยโลหะหนักและสารที่ขัดขวางหมู่ไทโอล (Thiol blocking reagents) กรดอะมิโน 18 ตัวแรกที่ปลายอะมิโนแสดงความใกล้เคียง (Homology) 88 เปอร์เซ็นต์ กับ เอนไซม์อะลิฟาติกอะมิเดส (Aliphatic amidase) ใน *Brevibacterium* sp. Strain R312

Hirrlinger และคณะ (1996) แยก *R. erythropolis* จากเชื้อที่สลายเอริลโพไพโอนาไมด์ (2-Arylpropionamides) พบว่าสามารถสลายอะคริลาไมด์เป็นกรดอะคริลิคและแอมโมเนียได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งในปีเดียวกัน Nawaz และคณะ ทำบริสุทธิ์เอนไซม์อะมิเดสที่สามารถสลายอะคริลาไมด์และอะลิฟาติกเอไมด์จาก *Klebsiella pneumonia* NCTR1 พบว่าเอนไซม์มีลักษณะเป็นโมโนเมอร์ที่มีมวลโมเลกุล 62,000 ดอลตัน ทำงานได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7.0 และที่อุณหภูมิเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส เอนไซม์บริสุทธิ์มีหมู่ซัลไฮดริล (Sulfhydryl group) อยู่ในบริเวณแอคทีฟและช่วยในการเร่งปฏิกิริยา และพบว่าในโมเลกุลของเอนไซม์มีโคบอล (Co^{2+}) และเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นองค์ประกอบด้วย

ต่อมาในปี 1998 Nawaz และคณะ ทำการทดสอบปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อกระบวนการสลายอะคริลาไมด์โดยเซลล์ตรึง *Rhodococcus* sp. พบว่า ที่ความเข้มข้นสูงของอะคริลาไมด์ 128 มิลลิโมลาร์ สามารถยับยั้งการเจริญของเซลล์แบคทีเรียได้ และในที่อุณหภูมิสูงๆ ความสามารถในการสลายอะคริลาไมด์ก็จะเพิ่มมากขึ้น ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการสลายอะคริลาไมด์ของเซลล์ตรึงคือที่ 7.0 โลหะคอปเปอร์ (Cu^{2+}) และนิกเคิล (Ni^{2+}) สามารถยับยั้งการสลายอะคริลาไมด์ได้ แสดงว่า ในบริเวณแอคทีฟ (Active sites) ของเอนไซม์อะมิเดสที่เร่งปฏิกิริยาการสลายอะคริลาไมด์ประกอบด้วยหมู่ซัลไฮดริล (Sulfhydryl; -SH) ส่วนอัตราเร็วในการสลาย (Rates of degradation) เพิ่มขึ้นได้โดยการเหนี่ยวนำของเหล็ก และจะลดลงได้จากสารพวกคลีเลเตอร์ (Chelator) เช่น EDTA หรือ 1,10-Phenanthroline บ่งชี้ถึงความเกี่ยวข้องของเหล็กในบริเวณเร่งของเอนไซม์อะมิเดส นอกจากนี้ยังพบว่าเซลล์ตรึงที่เตรียมแล้วสามารถเก็บไว้ใช้งานต่อได้ นานถึงสิบวัน โดยไม่มีผลกระทบต่อการสูญเสียอัตราการสลายอะคริลาไมด์แต่อย่างไร

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการโคลนยีนและแสดงออกปริมาณสูงเอนไซม์อะมิเดสที่จำเพาะต่ออะคริลาไมด์ นั้นยังพบรายงานไม่มากนัก ที่มีรายงานได้แก่ รายงานวิจัยของ Cheong และ Oriel ในปี ค.ศ. 2000

ที่ทำการโคลนยีนอะมิเดสจาก *Bacillus stearothermophilus* BR388 เข้าสู่ *E.coli* DH5α พบว่าเอนไซม์ที่แสดงออกจากโคลนสามารถสลายอะคริลาไมด์ได้ดีที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 7.0 และความเข้มข้นของอะคริลาไมด์คือ 1 โมลาร์ และเมื่อทำการมิวเตชั่น (Mutation) เอนไซม์ที่ได้ โดยการกรดอะมิโนฮีสทิดีนที่ตำแหน่ง 26 (His26) เป็นกรดอะมิโนอาร์จินีน (Arginine) พบปริมาณการแสดงออกของเอนไซม์เพิ่มขึ้น 23 เท่า และเมื่อเร็วๆนี้ Ryabchenko และคณะ (2006) ทำการโคลนยีนอะมิเดสจาก *Rhodococcus rhodochrous* M8 โดยเทคนิคพีซีอาร์ด้วยการใช้ไพรเมอร์ (Primer) ที่ออกแบบมาจากลำดับกรดอะมิโนของเปบไทด์ (Peptide) ที่ได้จากการย่อยเอนไซม์อะมิเดสด้วยเอนไซม์ทริปซิน (Trypsin) และตรวจสอบความสามารถในการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) สับสเตรทในกลุ่มเอไมด์พบว่า เอนไซม์ที่แสดงออกมีความจำเพาะต่อสับสเตรทที่เป็นอะลิฟาติกเอไมด์ (Aliphatic amide) สายสั้นรวมทั้งอะคริลาไมด์ด้วย แต่ปริมาณของเอนไซม์อะมิเดสที่โคลนได้มีการแสดงออกในระดับที่ไม่สูงกว่าเชื้อดั้งเดิม (Wild type) มากนัก

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า การสลายอะคริลาไมด์ด้วยเอนไซม์อะมิเดสนั้นต้องใช้เอนไซม์ที่อยู่ในรูปของเอนไซม์บริสุทธิ์ ที่มีการเตรียมหลายขั้นตอน หรือหากอยู่ในรูปของเอนไซม์ที่แสดงออกจากโคลนก็ยังไม่มีประสิทธิภาพในการสลายอะคริลาไมด์มากเท่าที่ควรทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของระดับการแสดงออกของเอนไซม์ที่ต่ำ และจากข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อเอนไซม์เกิดปฏิกิริยาไปแล้วจะไม่สามารถนำเอนไซม์นั้นกลับมาใช้ซ้ำได้อีก นอกเสียจากจะอยู่ในรูปของเอนไซม์ตรึง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ปริมาณเอนไซม์ต้นในระดับปริมาณที่สูง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีเป้าหมายที่จะผลิตเอนไซม์อะลิฟาติกอะมิเดสปริมาณสูง สำหรับใช้ในการสลายอะคริลาไมด์อย่างสมบูรณ์ โดยใช้เทคนิคทางพันธุวิศวกรรมโคลนยีนของเอนไซม์อะลิฟาติกอะมิเดสจากแบคทีเรียที่สามารถใช้ประโยชน์อะคริลาไมด์ ที่คัดเลือกได้ในห้องปฏิบัติการชีวเคมีสิ่งแวดล้อมและจุลินทรีย์บำบัด ได้แก่ *Enterococcus faecalis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Kluyvera ascorbata* และ *Enterobacter aerogenes* เป็นต้น (จิตติมา เจริญพานิช, 2551; Buranasilp *et al.*, 2009; Buranasilp & Charoenpanich, 2011; Thanyacharoen *et al.*, 2011) และดัดแปลงให้เกิดการแสดงออกปริมาณมาก จากนั้นจึงทำการตรึงรูปเอนไซม์ที่ได้จากการแสดงออก เพื่อนำมาใช้ซ้ำสำหรับกระบวนการสลายอะคริลาไมด์และการผลิตกรดอะคริลิกในระดับอุตสาหกรรมต่อไป เช่น ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตอะคริลิกเอสเทอร์ (Acrylic ester) ซึ่งเป็นโมโนเมอร์สำหรับโพลีอะคริลิก (Polyacrylic acid) ในอุตสาหกรรมการผลิตสีและการขัดเงาเครื่องหนัง หรือใช้เป็นโมโนเมอร์ร่วม (Co-monomer) กับเอทิลีน (Ethylene) ได้เป็นโพลีเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resin) สำหรับใช้ในการผลิตเครื่องกรองหรือเครื่องกลั่นน้ำ ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น (Danner *et al.*, 1998)