

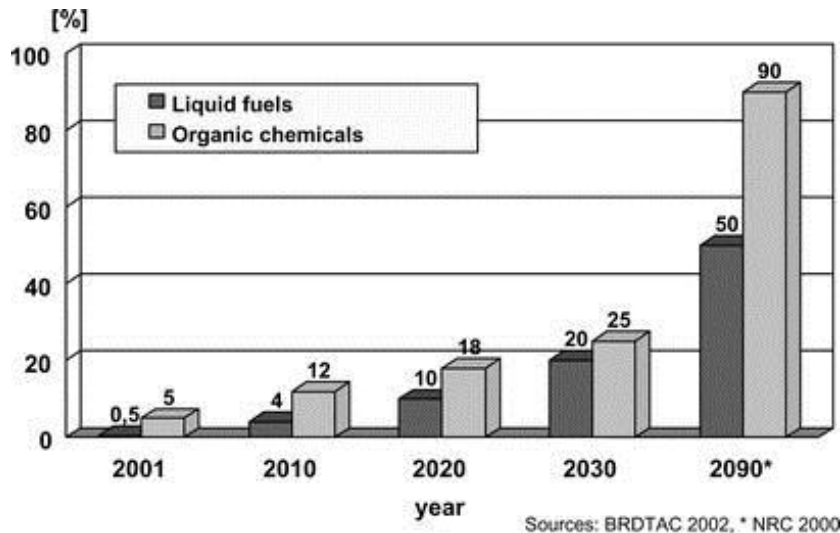
การสังเคราะห์และพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ โดยใช้สารเคมีที่มาจากชีวมวลนอกกลุ่มอาหารเป็นวัตถุดิบ

รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์
สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ในปัจจุบันโลกมีการพึ่งพาและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรปิโตรเลียมเพื่อพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานและใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ในปริมาณสูง และความต้องการดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในระหว่างปี 1980-2004 พบว่า อัตราการบริโภคเติบโตขึ้นถึงร้อยละ 50 [Energy Information Administration (EIA) International Outlook 2007. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.htm> (Accessed Dated: 14 June 2007)] และคาดการณ์กันว่าความต้องการทรัพยากรฟอสซิล จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสูงถึงประมาณ 600 1015 Btu ในปี ค.ศ. 2030.

อย่างไรก็ตาม หลายฝ่ายเริ่มตระหนักดีว่า การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรปิโตรเลียม มีข้อเสียและข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น การที่ทรัพยากรดังกล่าวมีอยู่อย่างจำกัดและใช้แล้วหมดไป (non-renewable resource) ส่งผลให้เกิดวิกฤติการณ์ด้านราคาน้ำมันในระยะที่ผ่านมาหลายครั้ง นอกจากนี้การเผาผลาญปิโตรเลียมในระหว่างกระบวนการผลิต การแปรรูปและการใช้งาน ยังอาจก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซ CO₂ ซึ่งเชื่อว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกิดปัญหาโลกร้อน ด้วยเหตุปัจจัยดังกล่าวข้างต้น จึงก่อให้เกิดความสนใจในการพัฒนาทรัพยากรทางเลือกอื่น ที่สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (renewable alternative resources) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ใช้เป็นแหล่งพลังงานและเป็นวัตถุดิบสารเคมีสำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่อง

ชีวมวล (biomass) จัดเป็นทรัพยากรทางเลือกประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ ดังจะเห็นได้จากตัวอย่าง เช่น ประเทศอเมริกา โดย Department of Energy [DOE] ได้ตั้งเป้าไว้ว่าภายในปี ค.ศ. 2025 จะต้องมีการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ แทนที่เชื้อเพลิงปิโตรเลียมสำหรับภาคขนส่ง ในปริมาณ 25 % และมีการใช้สารเคมีที่มาจากชีวมวลทดแทนการใช้สารอินทรีย์ที่มาจากปิโตรเคมีในปริมาณ 20% [Biomass Research and Development Initiative (BRDI) Roadmap for Biomass Technologies in the United State. <http://www.brdisolutions.com/pdfs/FinalBiomassRoadmap.pdf> (Accessed Date: 17 June 2007)]



รูปที่ 1 คาดการณ์แนวโน้มสัดส่วนร้อยละของการใช้สารเคมีจากชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงและสารอินทรีย์ของประเทศสหรัฐอเมริกา [Th.Willke, K.D.Vorlop, *Applied microbiolbiotechnol*, 66(2004)131-142]

ในขณะที่ประเทศในสหภาพยุโรปได้ตั้งเป้าไว้ว่าจะเพิ่มปริมาณการใช้สารเคมีและเชื้อเพลิงที่มาจากชีวมวลเป็น 2% และ 5.75% ในปี ค.ศ. 2005 และปี ค.ศ. 2010 ตามลำดับ [European Parliament and Council Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport. http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/en_final.pdf (Accessed Date: 17 June 2007)]

โดยทั่วไปแล้ว ชีวมวล จะหมายถึงสารอินทรีย์ที่หมุนเวียนและได้มาจาก พืช ต้นไม้ (เช่น แป้ง และเซลลูโลส) รวมไปถึงผลิตภัณฑ์และเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และขยะต่างๆ ซึ่งชีวมวลดังกล่าวมีปริมาณโดยรวม ประมาณ $1.7-2.0 \times 10^{11}$ ตันต่อปี [Zoebelin, H., *Dictionary of Renewable Resources*, Wiley VCH: Weinheim, 2001] แต่มีการนำไปใช้เพียง 6×10^9 ตัน ยิ่งไปกว่านั้น ร้อยละ 97 ของตัวเลขดังกล่าว จะใช้สำหรับอาหารในขณะที่ส่วนที่เหลือจะใช้ในด้านอื่น เช่น เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเคมี

โดยทั่วไปแล้ว ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส จะประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

- **เซลลูโลส (40-50%)** เป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยกลูโคสหลายหมื่นหน่วยซ้ำ เรียงตัวเป็นโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง มีสมบัติไม่ละลายน้ำ และจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีปริมาณมากที่สุด (ประมาณ 2×10^{10} ตันต่อปี)
- **เฮมิเซลลูโลส (20-30 %)** เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส โดยจะประกอบด้วยน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 ตัว (เช่น กลูโคส แมนโนส และกาลาโตส) และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 ตัว (เช่น อะราบิโนส และไซโลส)

- **ลิกนิน(15-25%)** เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำฟีนิลโพรพิน และมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแหที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ซึ่งลิกนินจะทำหน้าที่เป็นกาว เชื่อมติดส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน
[ทั้งนี้ทั้งนั้น อัตราส่วนองค์ประกอบ อาจจะไม่แปรตามชนิดของวัตถุดิบบ้าง]

Bio-refinery

Bio-refinery เป็นแนวคิดเรื่องการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเพื่อผลิตเชื้อเพลิง พลังงาน และสารเคมี โดยผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว กระบวนการแปรรูปดังกล่าว จะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ

1. การแยกชีวมวล ออกเป็นส่วนประกอบต่างๆ (เซลลูโลส ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส) โดยอาศัยกระบวนการต่างๆ เช่น การกรอง การใช้ตัวทำละลายสกัด และการกลั่น รวมไปถึงการเร่งให้พอลิเมอร์สลายตัว
2. การแปลงสารตัวกลางที่ได้จากขั้นแรก ไปเป็นสารเคมีที่มีคุณค่าหรือมีศักยภาพ (หรือเรียกว่า Building Block) เช่น แอลกอฮอล์ กรดlevulinic เป็นต้น โดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่น gasification, liquidation, fermentation,
3. การแปรรูปสารเคมีที่ได้ไปเป็นวัสดุหรือสารที่มีมูลค่าเพิ่ม เช่น การแปรรูปกรด levulinicไปเป็น diphenolic acid สำหรับสังเคราะห์พอลิเมอร์ ซึ่งการแปรรูปในขั้นตอนนี้มักจะเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น hydrogenation

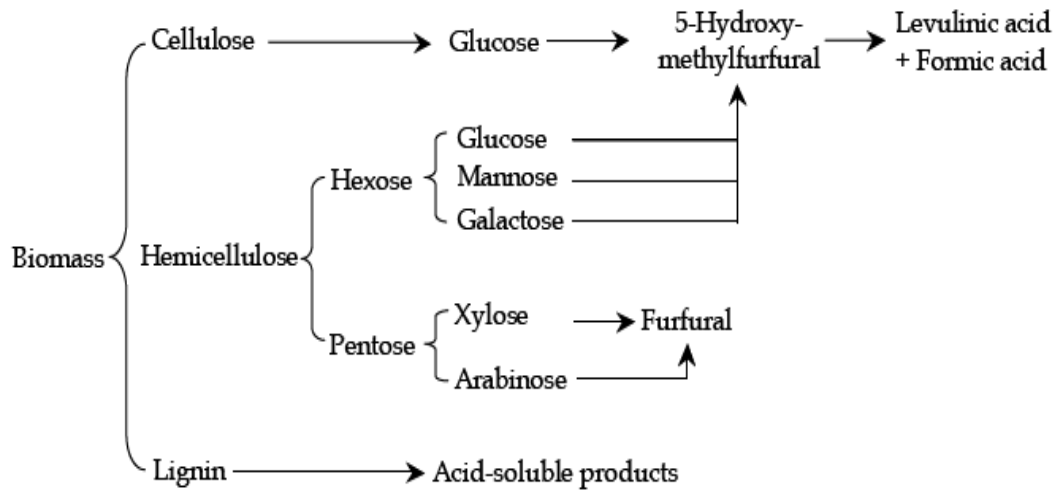
เมื่อปี ค.ศ. 2004 กลุ่มวิจัยจาก National Renewable Energy Laboratory [NREL] ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการศึกษาศักยภาพของสารเคมี ที่ได้มาจากชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส จำนวน 300 รายการ และกลั่นกรองคัดเลือกออกมาเป็นสารเคมี 12 รายการ ที่ถือได้ว่าเป็น **Building Blocks** ที่สามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นสารเคมีที่มีมูลค่าเพิ่ม และเป็นวัสดุได้ต่อไป[Werpy, T., Petersen, G., Top Value Added Chemicals from Biomass; Volume I-Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthetic Gas.; NREL/TP-510-35523; National Renewable Energy Laboratory (NREL): 2004] ซึ่งรายการ **Building Blocks**ดังกล่าว สรุปได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารเคมี 12 รายการ ที่ถือเป็น **Building Blocks** ในการพัฒนาเป็นสารเคมีที่มีมูลค่าเพิ่ม

Building Blocks
กรดซัคซินิก, กรดฟูมาริก และกรดมาลิก(1,4 succinic, fumaric and malic acids)
กรดฟูแรน ไดคาร์บอกซิลิก(2,5 furan dicarboxylic acid)
กรดไฮดรอกซี โพรพิโอนิก(3 hydroxy propionic acid)
กรดแอสพาทิก(aspartic acid)
กรดกลูคาร์ิก(glucaric acid)
กรดกลูตามิก (glutamic acid)
กรดอิทาโคนิก(itaconic acid)
กรดเลวูลินิก(levulinic acid)
ไฮดรอกซีบิวทิโรแลคโตน (3-hydroxybutyrolactone)
กลีเซอรอล(glycerol)
ซอร์บิทอล(sorbital)
ไซลิตอล และหรือ อะราบิไนทอล(xylitol/arabinitol)

ซึ่ง ในบรรดา **Building Blocks** ทั้ง 12 ตัว ข้างต้น Levulinic acid จัดเป็นสารเคมีที่น่าสนใจ เนื่องจากกรดดังกล่าว สามารถได้มาจากการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลส ที่มีอยู่ใน non-food biomass หลายๆ ชนิด เช่น ผักตบชวา (Water Hyacinth) ซึ่งการใช้พืชหรือชีวมวลดังกล่าว จะมีข้อดีในด้านของการไม่มีผลกระทบต่อหรือแข่งขันกับห่วงโซ่อาหาร อีกทั้งพืชดังกล่าวยังมีปริมาณมากและมีอัตราการเติบโตสูง ในขณะที่มูลค่าของพืชดังกล่าวต่ำและหรือบางครั้งถือเป็นขยะทางการเกษตร

Levulinic acid มีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า 4-oxopentanoic acid หรือ γ -ketovaleric acid ซึ่งโมเลกุลจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทกรดคาร์บอกซิลิกและหมู่คีโตน (รูปที่2) ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อแปรรูปไปเป็นสารเคมีชนิดอื่นที่มีมูลค่าเพิ่ม รวมไปถึงกระบวนการขึ้นปลายน้ำ ที่นำไปสู่การพัฒนาเป็นวัสดุพอลิเมอร์ต่อไป

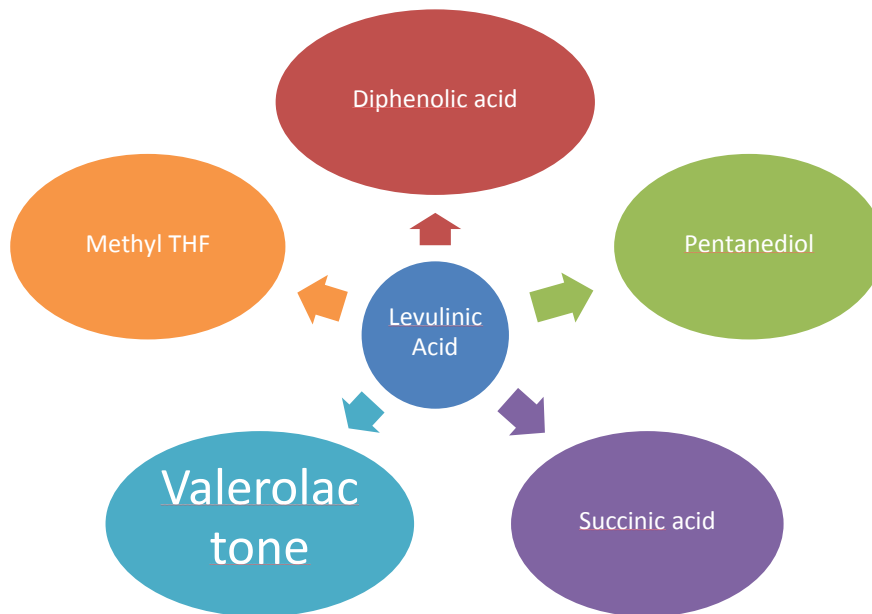


รูปที่ 2 การเตรียมกรดเลวูลินิกจากเซลลูโลสในชีวมวล

รูปที่ 2 แสดงแผนผังการแปลงผันจากเซลลูโลสในชีวมวล ไปเป็น levulinic acid [LA] ซึ่งกระบวนการที่สำคัญคือ การให้ความร้อนแก่ น้ำตาล หรือแป้ง โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ประมาณ 64.5 % โดยน้ำหนัก (เนื่องจากมีผลิตภัณฑ์ร่วม คือ กรดฟอร์มิก) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติอาจจะพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะต่ำกว่าค่าดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น humin (ซึ่งเป็นสารสีดำที่ไม่ละลาย) และ furfural เป็นต้น

ในปัจจุบัน มีโรงงานที่ผลิต levulinic acid สำหรับใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยใช้ lignocellulose เป็นวัตถุดิบ ตั้งอยู่ที่เมือง Caserta ประเทศอิตาลี โดยโรงงานดังกล่าว มีกำลังการผลิต 3,000 ตันต่อปี ของวัตถุดิบ โดยใช้สารตั้งต้นจาก tobacco bagasse และ paper mill sludge [Hayes, M.H.B., Biochar and biofuels for a brighter future. *Nature* 2006(443), 144] [Ritter, S., Biorefinery gets ready to deliver the goods. *Chemical & Engineering News*, August 21, 2006, p.47]

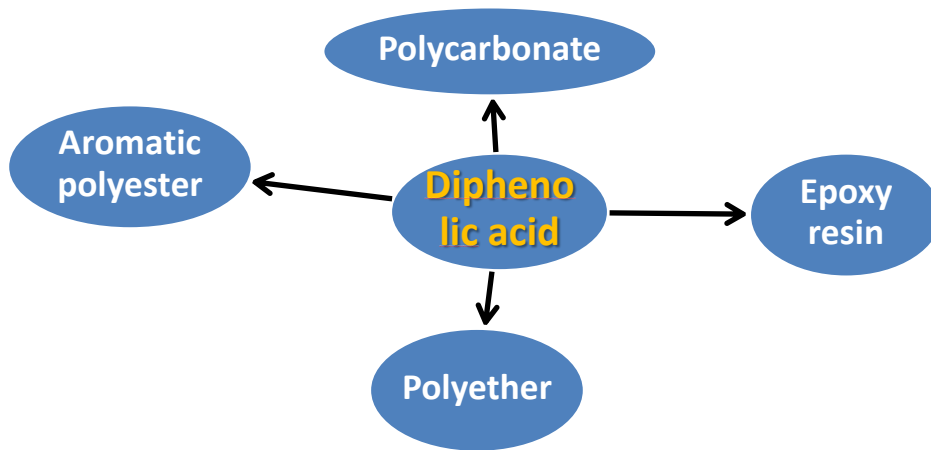
ศักยภาพในการนำ levulinic acid [LA] และอนุพันธ์ไปใช้งาน



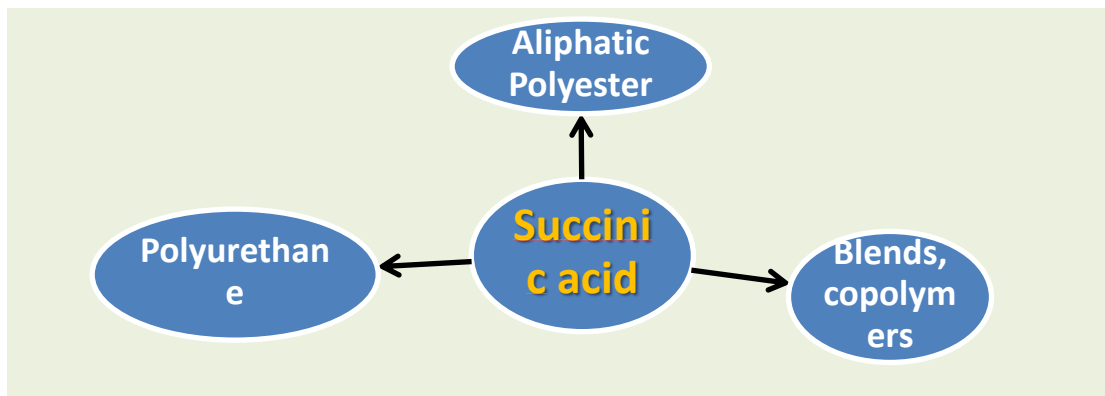
รูปที่ 3 แผนภาพแสดงสารเคมีที่ได้จากการตัดแปรรูปกรดเลวูลินิก

รูปที่ 3 เป็นแผนภาพ แสดงตัวอย่างของสารเคมีที่เป็นอนุพันธ์ของ levulinic acid [LA] ชนิดต่างๆ เช่น diphenolic acid, pentane diol, valerolactone, acetylacrylic acid และ succinic acid ซึ่งได้มาจากการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อตัดแปรรูปโครงสร้าง LA ในแบบต่างๆ เช่น

- การทำปฏิกิริยาระหว่าง LA กับฟีนอล ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยโมล จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น **diphenolic acid** ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้น (โมโนเมอร์) ในการสังเคราะห์อีพอกซี และ/หรือพอลิคาร์บอเนต (ใช้แทน bisphenol -A) รวมทั้งใช้สังเคราะห์ร่วมกับไดออล ได้เป็นพอลิเอสเตอร์
- LA สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น V_2O_5) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น กรดซัคซินิก (**succinic acid**) ซึ่งสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นโมโนเมอร์สำหรับสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ พอลิอีเทอร์และพอลิยูรีเทน ได้หลายชนิด และ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสังเคราะห์อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ



รูปที่ 4 ความเป็นไปได้ในการต่อยอดพัฒนาพอลิเมอร์จาก กรดไดฟีโนลิก ที่สกัดได้จากชีวมวล



รูปที่ 5 ความเป็นไปได้ในการต่อยอดพัฒนาพอลิเมอร์จาก กรดซัคซินิก ที่สกัดได้จากชีวมวล

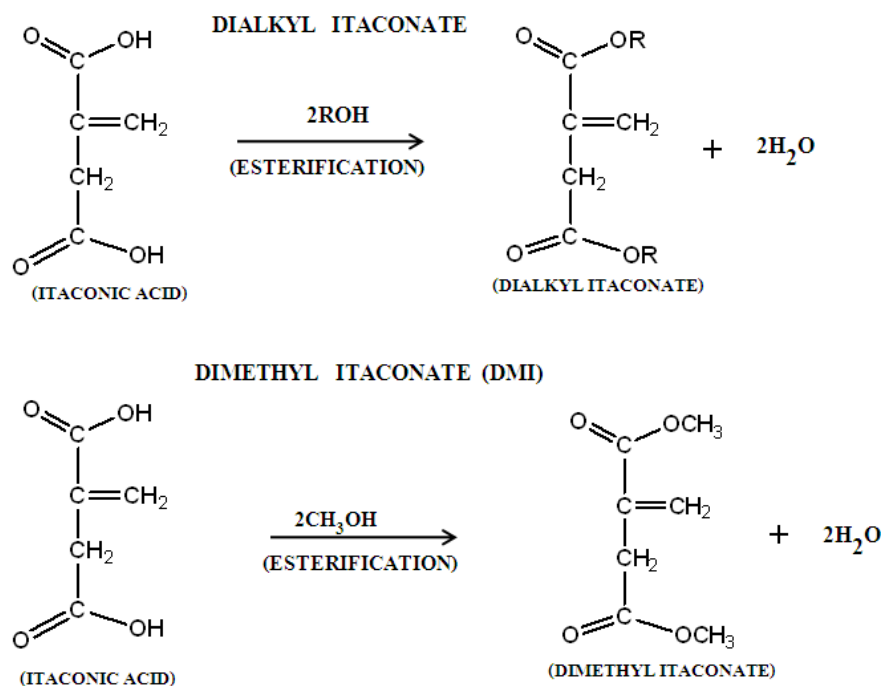
- ยิ่งไปกว่านั้น กรดซัคซินิก ยังสามารถนำไปดัดแปรโครงสร้างเคมี ได้เป็นอนุพันธ์ชนิดต่างๆ เช่น
 - γ -butyrolactone (GLB) ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของ succinic acid ซึ่ง GLB สามารถนำไปใช้เป็นสารเคมีด้านการเกษตรและทางเภสัชกรรม
 - บิวเทนไดออล(butanediol) [BDO] ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เช่น พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (PBT) รวมไปถึงพอลิเอสเตอร์ชนิดอื่นๆ และพอลิยูรีเทน และพอลิอีเธอร์
 - เตตระไฮโดรฟิวแรน(THF) ได้จากปฏิกิริยา dehydration ของ BDO ซึ่ง THF นิยมใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับพอลิเมอร์และใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเตตระเมทิลีนไกลคอล (ชื่อการค้า เส้นใย Spandex) และพอลิยูรีเทน
- LA สามารถนำไปทำปฏิกิริยา hydrogenation โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็น γ -valerolactone [GVL] ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวทำละลายและกาว

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการใช้สารเคมีจากชีวมวลจะมีแนวโน้มเติบโตมากขึ้นในอนาคต ไม่เฉพาะแต่เพียง ในด้านของการทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล และการทดแทนปิโตรเคมีด้วยสารเคมีจากชีวมวลเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการสังเคราะห์พัฒนาวัสดุพอลิเมอร์โดยใช้สารเคมีที่ได้จากการย่อยหรือสกัดชีวมวลเป็นวัตถุดิบด้วย ซึ่ง **Building Blocks** หลายๆ ชนิดล้วนมีศักยภาพและมีความเป็นไปได้สูง

อย่างไรก็ตาม การศึกษาและพัฒนาพอลิเมอร์ที่มาจากฐานชีวมวล ยังมีอยู่อย่างจำกัด ไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยในระดับต้นน้ำ (การสังเคราะห์โมโนเมอร์และพอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ) ระดับกลางน้ำ (การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีอยู่แล้ว) และระดับปลายน้ำ (การพัฒนาพอลิเมอร์คอมพาวด์ และเทคโนโลยีกระบวนการขึ้นรูป)

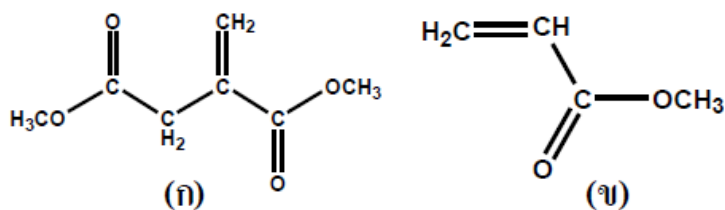
กรณีศึกษา การสังเคราะห์พอลิไดอัลคิลอิทาโคเนต

กรดอิทาโคนิกเป็นสารเคมีจากชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่ได้มาจากกระบวนการหมักของแป้งหรือลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเมื่อนำกรดดังกล่าวเข้าสู่ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะได้ไดอัลคิลอิทาโคเนตชนิดต่างๆ ที่มีความหลากหลายทางโครงสร้าง (ขึ้นอยู่กับหมู่อัลคิลหรือชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา) เช่น ไดเมทิลอิทาโคเนต ไดเอทิลอิทาโคเนต ไดโพรพิลอิทาโคเนต และไดบิวทิลอิทาโคเนต เป็นต้น โดยมีปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์ดังแสดงในรูปที่ 6



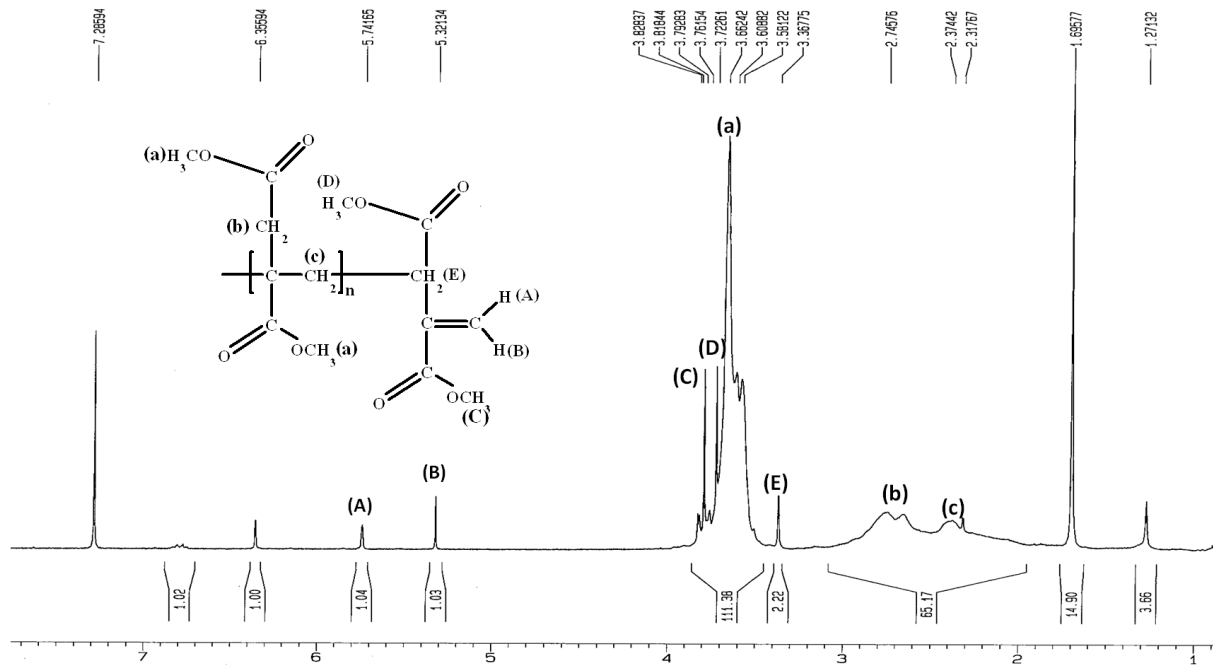
รูปที่ 6 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดอิทาโคนิก

จากการพิจารณาโครงสร้างเคมีของไดอัลคิลอิทาโคเนต (รูปที่ 7) จะพบข้อสังเกตว่า โมโนเมอร์ในตระกูลดังกล่าวจะมีโครงสร้างคล้ายกับสารจำพวกอะคริเลตหรือไวนิลอะซิเตต ในด้านของการมี หมู่ฟังก์ชันประเภทเอสเทอร์และการมีพันธะคู่หรือเรียกว่าจัดอยู่ในกลุ่มไวนิล โมโนเมอร์ จึงทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะทาการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกในลักษณะเดียวกัน กับอะคริเลตได้ ดังตัวอย่างของการสังเคราะห์พอลิไดเมธิลอิทาโคเนต ที่มีสเปกตรัม NMR แสดงดังรูป ที่ 8



รูปที่ 7 โครงสร้างเคมีของไดเมธิลอิทาโคเนต (ก), และเมธิลเมทาคริเลต (ข)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Popovic และคณะ [Popovic I.G., 2005, “The Non-oxidative Thermal Degradation of Poly(di-n-alkyl itaconates) II. Analysis of the Polymer Residue,” *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 89, pp.165-174] ซึ่งสังเคราะห์และศึกษาสมบัติทางความร้อนของ พอลิไดอัลคิลอิทาโคเนตชนิดต่างๆ พบว่าพอลิเมอร์ที่ได้มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้าย แก้ว (T_g) ที่หลากหลาย (ตารางที่ 2) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและความเกะกะของหมู่แทนที่ในโครงสร้าง โมเลกุลของพอลิเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุล (ดังตัวอย่างในกรณีของ รูปที่ 8-9 ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 10,000 กรัมต่อโมล)

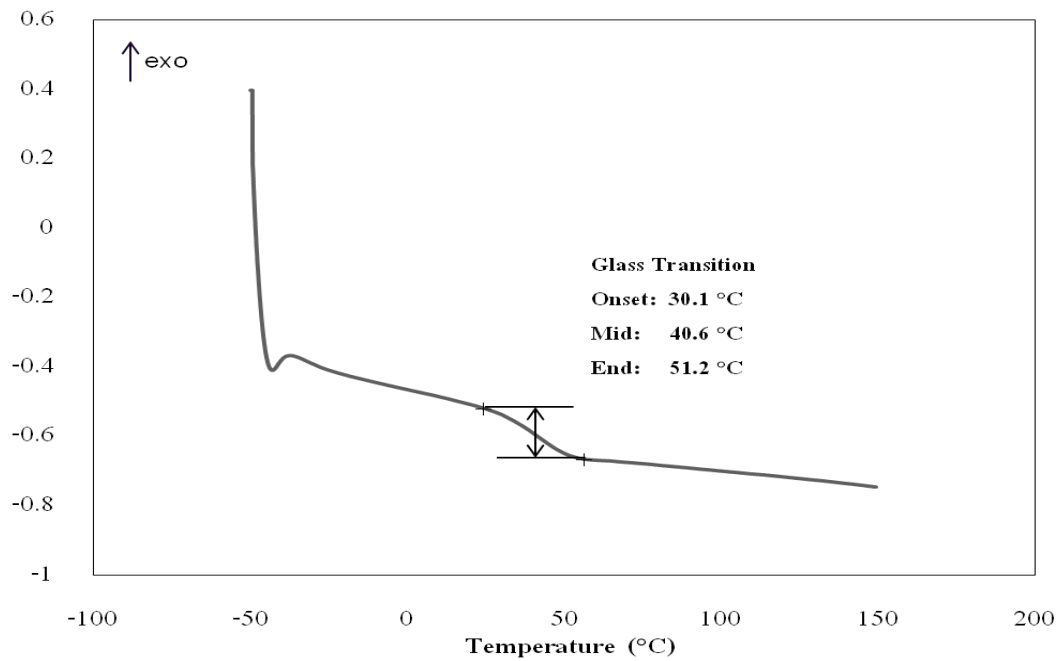


รูปที่ 8 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของพอลิไดเมทิลอีทาโคเนต

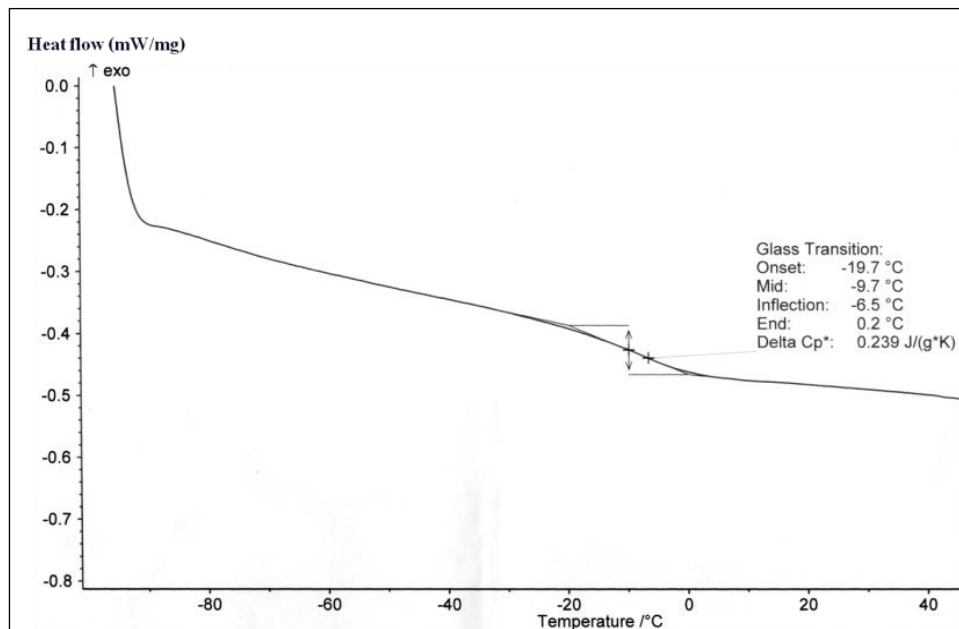
ตารางที่ 2 อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และค่าความสามารถการละลายของพอลิไดอัลคิลอีทาโคเนตชนิดต่าง ๆ [ที่มา Popovic I.G., *Polymer Degradation and Stability*, 89(2005) 165-174]

ชนิดพอลิเมอร์	ชื่อย่อ	อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าการละลาย (J/cm^3) ^{1/2}
พอลิไดเมทิลอีทาโคเนต	PDMI	95	19.6
พอลิไดเอทิลอีทาโคเนต	PDEI	58	18.5
พอลิไดโพรพิลอีทาโคเนต	PDPI	34	18.3
พอลิไดบิวทิลอีทาโคเนต	PDBI	12	18.2
พอลิไดเอมิลอีทาโคเนต	PDAI	5	17.7
พอลิไดเฮกซิลอีทาโคเนต	PDHxI	-18	17.3
พอลิไดเฮปทิลอีทาโคเนต	PDHpI	-85	16.9
พอลิไดออกทิลอีทาโคเนต	PDOI	-82	16.8
พอลิไดโนนิลอีทาโคเนต	PDNI	-76	16.7
พอลิไดเดคคิลอีทาโคเนต	PDDI	-63	16.6
พอลิไดโดเดคคิลอีทาโคเนต	PDDdI	-48	-

Heat flow (mW/mg)



รูปที่ 8 DSCเทอร์โมแกรมของพอลิไดเมซิลอทาโคนด



รูปที่ 9 DSCเทอร์โมแกรมของพอลิไดบิวทิลอทาโคนด