



งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ เป็นเทคนิคที่ได้ศึกษาและปฏิบัติมาเป็นเวลานานเพื่อที่จะให้ยางมีสมบัติต่าง ๆ ที่ดีขึ้น โดยการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน จะใช้กรดเปอร์ออกซิที่เตรียมใหม่เช่น peracetic acid , performic acid หรือ hydrogen peroxide ผสมกับ organic acid เช่น formic acid และ acetic acid เป็นต้น โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาดังนี้

Burfield และคณะ ได้ศึกษาและพบว่าหมู่อิพอกซิของยางธรรมชาติ จะเสถียรก็ต่อเมื่ออยู่ในสภาวะควบคุมที่ดี ไม่เช่นนั้นจะส่งผลให้วงแหวนของหมู่อิพอกซิเกิดการขยายตัว และเปิดออกเกิดเป็นอนุพันธ์ขั้นที่สอง เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีกรด formic และ hydrogen peroxide มากเกินไป ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ เช่น ปริมาณของหมู่อิพอกซิ , การกระจายตัวของหมู่อิพอกซิ , การเปิดและขยายตัวของวงอิพอกซิ และสมบัติอื่น ๆ (Burfield et al., 1997)

Gelling IR. รายงานว่าอุณหภูมิกลายแก้ว (Tg) ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณของหมู่อิพอกซิ เมื่อปริมาณของหมู่อิพอกซิเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 75 mol% ทำให้ค่า Tg เพิ่มขึ้นจาก 204 ถึง 264 K และเมื่อปริมาณหมู่อิพอกซิเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างที่เป็นโครงข่ายสามมิติเกิดการฟอร์มตัวขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความเป็นกรดสูง ซึ่งจากสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ทำให้มีความสำคัญที่จะทำปฏิกิริยา depolymerization ยางธรรมชาติ หลังจากทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน เพื่อที่จะเพิ่มปริมาณหมู่อิพอกซิ ในขณะที่เดียวกันกับน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง (Gelling IR., 1999)

Tangpakdee และคณะ รายงานว่าเมื่อยางถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วย peracolytic enzyme และ สารลดแรงตึงผิว ในการเตรียมยางธรรมชาติขจัดโปรตีน หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันด้วย peracetic acid แล้วทำปฏิกิริยา polymerization เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในสภาพน้ำยางได้ด้วย peroxide ใน propanal และพบว่าหมู่ปลายของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเฉลี่ยของมวลโมเลกุล ประมาณ 1.8×10^4 เป็นพวก aldehyde และ ketone (Tangpakdee et al., 2000)

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่จะนำยางธรรมชาติอิพอกไซด์มาใช้เป็นโพลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ สำหรับทำแบตเตอรี่ลิเทียม (ลิเทียม-พอลิเมอร์) เพื่อให้ได้แบตเตอรี่ที่บางและเบาสามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงได้หลายแบบ มีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าแบตเตอรี่ ลิเทียม-ไอออน เมื่อมีการชาร์จไฟเกินพิกัด ซึ่งหมายความว่า การนำวงจรพิเศษมาใช้ก็จะน้อยลงด้วย โดยเริ่มตั้งแต่ปี 1973 Fenton และคณะ ได้รายงานถึงการทำให้โพลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ (SPE) ซึ่งประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าเป็น alkaline salt complex กับโพลิเมอร์ คือ โพลีเอทรีลีนออกไซด์ (PEO) จากนั้นก็มีความสนใจอย่างต่อเนื่องในการศึกษาโพลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ โดยการศึกษาส่วนใหญ่จะสนใจพัฒนาการนำ

ไฟฟ้าของระบบ PEO-salt แต่ปรากฏว่าค่าการนำไฟฟ้าที่ได้ต่ำอยู่ในช่วงประมาณ 10^{-6} - 10^{-8} Scm^{-1} ซึ่งการที่ค่าการนำไฟฟ้าต่ำเนื่องจากระบบ PEO-salt จะเกิดรูปร่างเป็นคริสตัลบางส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C ทำให้เสียความยืดหยุ่นและค่าการนำไฟฟ้าลดลง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้หลายทาง เช่น โดยการเพิ่มปริมาณของอะมอร์ฟัสเฟส การใช้ โพลีเอทิลีนออกไซด์ กราฟต์พอลิเมอร์ หรือ ไฮบริดส์พอลิเมอร์ การเติม plasticizer (ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ที่เติมลงในพอลิเมอร์ทำให้เพิ่มความยืดหยุ่นและเหนียวทนทาน เช่น เอทิลีนคาร์บอเนต (EC) โพรไพลีนคาร์บอเนต (PC) หรือ การใช้เจลพอลิเมอร์ อิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น (Paulsdorf et al., 2004)

สำหรับการทำเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ทำโดยการเติมลิควิดอิเล็กโทรไลต์ (เกลือลิเทียมละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เอทิลีนคาร์บอเนต (EC) โพรไพลีนคาร์บอเนต (PC) ไดเมทิลคาร์บอเนต (DMC)) ลงในสารตัวกลางที่เป็นพอลิเมอร์ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ เช่น โพลีอะคริลาไมด์ (PAN) (Appetecchi et al., 1997) โพลีเมทิลอะคริเลต (PMMA) โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) (Ciuffa et al., 2004) โพลีเอทิลีนออกไซด์ (PEO) (Y. Tominaga et al., 2000) โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) โพลีไวนิลซัลโฟน เป็นต้น ซึ่งการศึกษาในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเน้นไปในการใช้เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากสามารถให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงได้ถึง 10^{-3} Scm^{-1} ที่อุณหภูมิห้อง โดยในเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์นี้ ตัวทำละลายอินทรีย์จะทำหน้าที่ช่วยในการนำพาไอออน และเป็น plasticizer ของสารตัวกลางที่เป็นพอลิเมอร์ ดังนั้น เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการดูดซับและหน่วงเหนี่ยวลิควิดอิเล็กโทรไลต์จึงสามารถนำไปใช้ในแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนได้แต่อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลของเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ไม่เหมาะสมที่จะสามารถทำเป็นฟิล์มบางได้ เช่น การทำให้พอลิเมอร์ที่มีขั้วอิมตัวด้วยลิควิดอิเล็กโทรไลต์จะทำให้พอลิเมอร์มีความนุ่มเกินไปและเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีสมบัติเชิงกลน้อยสามารถทำให้เกิดวงจรลัดภายใน และเสี่ยงต่อความปลอดภัยได้

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ในการทำพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์

Appetecchi, และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของ lithium-ion conducting polymeric membranes ชนิดใหม่ คือ $\text{LiClO}_4\text{-EC-PC-PAN}$, $\text{LiClO}_4\text{-EC-PC-PMMA}$ และ $\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{-EC-DMC-PMMA}$ ในการศึกษาผลที่ได้ในเมมเบรน แต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน โดยได้ ไอออนิก เมมเบรนที่เสถียร มีค่าการนำไฟฟ้า ที่สูง คือ ประมาณ 10^{-3} Scm^{-1} ที่อุณหภูมิห้อง เมมเบรนที่ได้มีสมบัติสอดคล้องที่จะนำมาใช้ทำเป็นแบตเตอรี่ลิเทียม แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าในระยะยาวหรือการใช้สภาวะที่แตกต่างจากเดิม สามารถทำการชาร์จไฟใหม่ได้เต็มความจุหรือไว้วางใจในประสิทธิภาพได้อย่างเต็มที่ แต่อย่างไรก็ดีเมมเบรนนี้เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบชั้นสูงของแบตเตอรี่ประสิทธิภาพสูง และอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน (power source) (G.P. Appetecchi et al., 1997)

Denis Ostrovski, และคณะ ได้ศึกษาสมบัติการเป็นตัวขนส่งไอออน และ molecular interaction ใน พอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์ แบบเจล 2 ชนิด คือ โพลีอะคริลาไมด์ (PAN) และ โพลีเมทิลอะคริเลต (PMMA) ซึ่งจะเติมสารละลายของ LiClO_4 ใน EC-PC การวิเคราะห์ผลจะเปรียบเทียบสมบัตินำไฟฟ้า และศึกษา Raman spectrum พบว่า การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงประมาณ 10^{-3} Scm^{-1} โดยค่าการนำไฟฟ้า ของระบบ $\text{LiClO}_4/\text{EC-PC/PAN}$ จะสูงกว่าระบบ $\text{LiClO}_4/\text{EC-PC/PMMA}$ เล็กน้อย เนื่องจากในกรณี โพลีอะคริลาไมด์ เมทริกซ์ จะเกิดพันธะที่แข็งแรงระหว่างไอออน ที่ถูกละลายกับ โมเลกุลของตัวถูกละลาย แต่ในกรณี โพลีเมทิลอะคริเลตพบว่าแรงนี้จะอ่อน แต่ทั้ง 2 ชนิดก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ที่ชาร์จใหม่ได้ (Denis Ostrovski et al., 1998)

Yoichi Tominaga, และคณะ ได้ศึกษาการเติมเกลือ lithium มวลโมเลกุลต่ำ เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า ของโพลีเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ที่มีมวลโมเลกุลเฉลี่ย 1000 และมีเกลือ sulfonamide lithium ที่ปลายพอลิเมอร์ ทั้งสอง ($\text{PEO}_{1000}/\text{SALi salt hybrid}$) ในการศึกษา Differential scanning calorimetry (DSC) เพื่อหาค่าของอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ผลที่ได้บ่งบอกว่าของผสมเป็นอะมอร์ฟัส โดยไม่เกิดการฟอร์มตัวเป็นผลึกที่โซ่ของโพลีเอทิลีนออกไซด์เลย ส่วนการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า พบว่าเมื่อใช้เกลือลิเทียม เป็น LiClO_4 ได้ค่า $1.6 \times 10^{-4} \text{ Scm}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งค่าที่ได้จะสูงกว่าเมื่อไม่เติมเกลือลิเทียม 3.8 เท่า ในการเติมเกลือลิเทียม ที่มี lattice energy ต่ำ เช่น LiClO_4 , LiTFSI ปริมาณเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า แต่ถ้าเติมเกลือลิเทียม ปริมาณเพิ่มขึ้น จะทำค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากไปเพิ่มค่า T_g แสดงว่าค่า T_g มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า มากกว่า ค่า lattice energy ของเกลือที่เติมลงไป (Yoichi Tominaga et al., 2000)

M. Yoxhizawa, และคณะ ได้ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติ(NR) ผสมกับโพลีเอทิลีน ออกไซด์ ที่มีมวลโมเลกุล 1000 เป็นเพื่อทำเป็นพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์ โดยโพลีเอทิลีนออกไซด์ที่ใช้มี 2 แบบคือ โพลีเอทิลีนออกไซด์ ที่บรรจุ Lithium benzenesulfonate ($\text{PEO}_{1000}/\text{LiBs}$) และ โพลีเอทิลีนออกไซด์ ที่มี benzenesulfonate group ที่ปลายทั้ง 2 ($\text{PEO}_{1000}\text{-(BSLi)}_2$) และนอกจากนั้นใช้อีกระบบเป็น ยางธรรมชาติผสมกับ 1-ethyl-2,3-dimethylimidazolium bromide(ImB) ในการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า ของระบบ $\text{NR}/\text{PEO}_{1000}/\text{LiBs}$ ที่ความเข้มข้นของยาง 40 wt% ได้ 10^{-6} Scm^{-1} ที่ อุณหภูมิ 50°C ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับระบบ PEO/LiBs เมื่อนำไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์โดยเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติบริสุทธิ์พบว่าระบบนี้ยังคงรักษาสมบัติทางฟิสิกส์ของยางอยู่ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของยางเป็น 10 wt% พบว่าค่าการนำไฟฟ้า ของระบบ $\text{NR}/\text{PEO}_{1000}/\text{LiBs}$ สูงขึ้น ได้ค่า $2.7 \times 10^{-5} \text{ Scm}^{-1}$ ซึ่งมากกว่าระบบ PEO/LiBs 10 เท่า ส่วนในระบบ $\text{NR}/\text{PEO}_{1000}\text{-(BSLi)}_2$ ไม่พบว่าค่าการนำไฟฟ้า จะสูงขึ้นกว่าการไม่เติมยางธรรมชาติ สำหรับระบบ NR และ ImB จะให้ค่าการนำไฟฟ้า สูงกว่า $\text{PEO}_{1000}\text{-(BSLi)}_2$ 10 เท่า จากข้อมูลที่ได้แสดงว่า ค่าการนำไฟฟ้า ของระบบจะสูงขึ้นเมื่อเติมเมทริกซ์ที่นำไฟฟ้าและมีเกลือเติมลงไป ในการศึกษาอุณหภูมิคล้ายแก้ว(T_g) ของ NR/PEO โดยใช้การวัด

DSC จะให้กราฟที่แสดงให้เห็นถึงการแยกกันของค่า T_g เป็น 2 ส่วน ซึ่งแสดงว่าเกิดเฟสที่แยกจากกันระหว่าง PEO และ เฟสของยางธรรมชาติ (M. Yoxhizawa et al., 2000)

J. Paulsdorf, และคณะ ได้ศึกษาและสังเคราะห์ polyphosphazene-based electrolytes 2 ชนิด คือ poly[bis(bethoxy-ethoxy-ethoxy)-phosphazene](MEEP) กับ lithium triflate และอีกชนิดคือเกลือโซเดียม ของ sulfonated poly[bis(phenoxyethoxy)phosphazene](PhEP) จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ พบว่า MEEP/LiCF₃SO₃ ได้ใช้กระบวนการสังเคราะห์ที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้เป็นตัวพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ในการศึกษา impedance spectroscopy ของ MEEP/LiCF₃SO₃ ที่อุณหภูมิระหว่าง 20°C และ 70°C จะได้ค่าการนำไฟฟ้า 10^{-5} Scm⁻¹ ที่อุณหภูมิ 25°C ส่วนในกรณีเกลือ sodium ของ PhEP จะมีความไวเฉพาะต่อการเปลี่ยนแปลงความดันไอของน้ำ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นตัวความชื้น sensitive sensor โดยในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จะให้ค่าการนำไฟฟ้า ที่ 4.7×10^{-2} Scm⁻¹ ที่อุณหภูมิ 25°C (J. Paulsdorf et al., 2004)

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก แต่ที่ผ่านมามีการศึกษาใช้ยางธรรมชาติในการทำพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ยังน้อยอยู่ ซึ่งมีรายงานการวิจัยดังนี้

Razali Idris และคณะ ได้นำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ และมีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) มาใช้ 3 ชนิด คือ ENR-25 (ยาง ENR ที่มีหมู่ epoxy 25% บนโซ่หลัก) ENR-50 (ยาง ENR ที่มีหมู่ epoxy 50% บนโซ่หลัก) และ โพลีเมทิลเมทาไครเลทกราฟต์กับยาง (MG-49) แล้วทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงความร้อนของระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติม plasticizer และระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เติม plasticizer คือ เอทิลีนคาร์บอเนต (EC) และ โพรไพลีนคาร์บอเนต (PC) โดยนำตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดมาละลายในตัวทำละลายแล้วเติมเกลือลิเธียม (LiCF₃SO₃) หลังจากนั้นจึงนำไปทำเป็นแผ่นฟิล์มความหนา 2 – 5 มิลลิเมตร การศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า ของระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติม plasticizer จะให้ค่าการนำไฟฟ้า ในช่วง 10^{-6} – 10^{-5} Scm⁻¹ ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เติม plasticizer โดยผสมกับ 50 – 100% EC/PC โดยน้ำหนัก ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเสถียร และให้ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องในช่วง 10^{-4} – 10^{-3} Scm⁻¹ ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนจะพบว่า ค่า T_g เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ แต่การใส่ EC และ PC ลงไปในระบบจะช่วยลดค่า T_g ลง จึงมีผลทำให้พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากยางธรรมชาติดัดแปลง เหมาะสมในการนำไปทำแบตเตอรี่ลิเธียม (Razali Idris et al., 2001)

Glasse และคณะ ได้ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติดัดแปลง (ENR) ร่วมกับโพลีเอทรีนออกไซด์ เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ยาง ENR 2 ชนิด คือ ENR-25 และ ENR-50 ในการทดลอง ได้ศึกษา ค่าการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงความร้อนของระบบ 2 ระบบคือ ระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติม plasticizer และ ระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เติม plasticizer และใช้เกลือลิเธียม lithium triflate (LiCF₃SO₃) ส่วน plasticizer จะใช้ EC และ PC ผลการศึกษาการนำไฟฟ้า ของ

ระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เติม plasticizer อยู่ในช่วง 10^{-6} - 10^{-5} Scm⁻¹ ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนระบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เติม plasticizer ซึ่งใช้ 100% ของ EC/PC โดยน้ำหนักของ พอลิเมอร์ (ENR/PEO) ให้ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-4} Scm⁻¹ ที่อุณหภูมิห้อง ส่วน T_g สำหรับระบบ ENR-25 มีค่า T_g -43 °C และ ระบบ ENR-50 มีค่า T_g -20 °C (Glasse et al., 2003)

Klinklai และคณะ ได้เตรียม liquid epoxidized deproteinized natural rubber (LEDPNR) โดยการนำยางธรรมชาติสด ๆ มาทำให้บริสุทธิ์โดยการขจัดโปรตีนด้วยเอนไซม์และสารลดแรงตึงผิว จากนั้นทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันด้วยกรดเพอร์อะซิติกที่เตรียมใหม่ๆ ซึ่งจะได้ epoxidized deproteinized natural rubber (EDPNR) เมื่อศึกษา T_g ของยางพบว่า ค่าจะเพิ่มขึ้นหลังจากการทำอีพอกซิเดชัน และเมื่อตัดพอลิเมอร์ด้วย (NH₄)₂S₂O₈ ในโพรพานาล พบว่าค่าการนำไฟฟ้า ที่ 323° K มีค่าประมาณ 1.98×10^{-6} Scm⁻¹ ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับในกรณีของโพลีเอทิลีนออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวที่ใช้ทำโซลิดพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (SPE) ที่เคยศึกษามา ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ LEDPNR เป็น SPE เนื่องจากมีความเป็นขั้วสูงเพียงพอสำหรับจะนำไปประยุกต์ใช้เป็น SPE ในการขนส่ง Li⁺ (Klinklai et al., 2003)

Famiza Latif และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์แบบฟิล์มบาง โดยใช้ โพลีเมทิลอะครีเลต (PMMA) ผสมกับ ENR-50 และ โดปด้วยเกลือ lithium triflate (LiCF₃SO₃) ซึ่งในการทดลอง ได้ใช้ความเข้มข้นของ PMMA คงที่ในทุกชุดการทดลอง และเติมยาง ENR-50 ที่ความเข้มข้น 10% และ 20% โดยน้ำหนักของ PMMA ส่วนเกลือ Lithium triflate ใช้ความเข้มข้น 20% , 40% และ 60% โดยน้ำหนักของ PMMA ผลการทดลองพบว่า การผสมยาง ENR-50 ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น มากกว่า 100 เท่า เมื่อเทียบกับ PMMA/ LiCF₃SO₃ ที่ไม่ผสมยาง ENR-50 ซึ่ง ENR-50 ทำหน้าที่คล้าย plasticizer ช่วยลดความหนืด เพิ่มความยืดหยุ่นให้ PMMA โดยค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่ได้คือ 5.09×10^{-5} Scm⁻¹ ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้ความเข้มข้นของ Lithium triflate 60% และ ผสมกับยาง ENR-50 10% การเพิ่มความเข้มข้นของยาง ENR-50 จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่มากเกินไประหว่างโซ่ และการเกิด crosslinking (Famiza Latif et al., 2006)

เนื่องจากรางวัลวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการผลิตยางอีพอกไซด์โดยใช้สารเคมี โดยเฉพาะพวกเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นกรดที่ค่อนข้างแรง เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม จึงสนใจที่จะศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์โดยใช้เอนไซม์ซึ่งเอนไซม์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันมีหลายตัวด้วยกัน เช่น ในกลุ่มของ haloperoxidase คือ chloroperoxidase bromoperoxidase และ Lipoxygenase โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Janusz และคณะ ได้ศึกษาเมตาบอลิซึมของ [¹⁴C](+)-benzo-(a)pyrene-trans-7,8-dihydrodiol ด้วย lipoxygenaseบริสุทธิ์สูงที่ได้จากถั่วเหลืองผสมกับกรดไลโนเลอิก จะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น

benzo(a)pyrene-anti-7,8-dihydrodiol,9,10-epoxide โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะขึ้นกับความเข้มข้นของเอนไซม์ และสามารถยับยั้งปฏิกิริยาโดยใช้กรด nordihydroguaiaretic (Janusz et al., 1989)

Hughes และคณะ ได้ใช้ lipoygenase เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ 7,8-dihydrobenzo[a]pyrene (BP-7,8-diol) โดยในการทำปฏิกิริยาจะสามารถใช้ 5- และ 15-lipoygenase ในสถานะที่มี กรด arachidonic กรดไลโนเลอิก หรือ กรด 15-hydroperoxyeicosatetraenoic (15-HPETE) อย่างใดอย่างหนึ่ง ผลลัพธ์หลักที่ได้คือ anti-9,10-epoxy-7,8-dihydroxy-7,8-dihydrobenzo[a]pyrene ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับเวลา ความเข้มข้นเอนไซม์ และความเข้มข้นของกรดไขมัน (Hughes et al., 1989)

Hamberg และคณะ ได้บ่มกรดไลโนเลอิกกับถั่ว (*Vicia faba* L.) โดยใช้เอนไซม์ lipoygenase จะนำไปสู่การเกิดผลิตภัณฑ์เป็น 13(S)-hydroxy-9(Z),11(E)-octadecadienoic acid, 9,10-epoxy-12(Z)-octadecenoic acid 12,13-epoxy-9(Z)-octadecenoic acid และ 9,10-epoxy-13(S)-hydroxy-11(E)-octadecenoic acid ในการศึกษาปฏิกิริยาใช้ $^{18}\text{O}_2$ เป็นตัวบ่งชี้ออกซิเจนของ 13(S)-hydroperoxy-9(Z),11(E)-octadecadienoic acid ในการเกิดเป็นอีพอกไซด์ออกซิเจนใน 9,10-epoxyoctadecanoic acid และ 9,10-epoxy-13(S)-hydroxy-11(E)-octadecenoic acid (Hamberg et al., 1990)

Hidalgo และคณะ ได้ศึกษาการสังเคราะห์และปฏิกิริยาของ epoxyketoacid 2 ตัว คือ (methyl (Z)-9,10-epoxy-13-oxo-(E)-11-9ctadecenoate(IV) และ (methyl (Z)-9,10-epoxy-13-oxo-(E)-11-9ctadecenoate(V) ซึ่งปฏิกิริยาทำโดยใช้กรดไลโนเลอิกทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ lipoygenase แล้วจึงทำปฏิกิริยากับตัวอย่าง ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคิดเป็น 14% และ 3% สำหรับสารประกอบ (IV) และ (V) ตามลำดับ (Hidalgo et al., 1992)

การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอภายใต้การควบคุมในสถานะที่เหมาะสม ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ผลิตและสิ่งแวดล้อม และจากรายงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบการใช้เอนไซม์ Lipoygenase ในการผลิตยางธรรมชาติอีพอกไซด์ การวิจัยครั้งนี้จึงจะศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเอนไซม์ Lipoygenase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลของยาง