

การศึกษาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสไตรีนโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ที่มีต่อผลิตภัณฑ์

Study of Kinetics Constant of Polymerization of Styrene by Using Simulation Program and Effect of Reactor Temperature on Products

นิชา ศรีจันทร์นนท์¹ และ ไพศาล กิตติสุภกร²

¹นิสิตปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิสไตรีนเกรดการใช้งานทั่วไป โดยเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ใช้ในการเดินเครื่องของบริษัท ไทยสไตรีนิกส์ จำกัด สำหรับการสร้างแบบจำลองจะต้องหาค่าคงที่ Kinetic ของการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำ โดยมีความความผิดพลาดของข้อมูลได้ไม่เกิน 10% เมื่อเทียบกับค่าจริง เพื่อให้โปรแกรมนี้มีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้ แบบจำลองนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้เป็นโมเดลสำหรับการทำนายแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยา การหาสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และที่ 2 จากการทดลองแล้วพบว่าค่าคงที่ Kinetic ที่มีผลต่อค่าน้ำหนักโมเลกุลและค่า Yield (ค่าร้อยละของผลผลิตที่ได้เมื่อเทียบกับสารที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการผลิต) โดยค่าคงที่ Kinetic ของขั้น Propagation ที่เหมาะสมอยู่ที่ $10,902,975 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ และค่าคงที่ Kinetic ของขั้น Termination มีค่าอยู่ที่ $1,255,000,000 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์เครื่องแรกและเครื่องที่สองพบว่าเมื่ออุณหภูมิถังปฏิกรณ์เครื่องแรกหรือเครื่องที่สองเพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนลดลง แต่ทำให้ค่า Yield เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: พอลิเมอร์ไรเซชัน พอลิสไตรีน

Abstract

This study is to make steady simulation model of general-purpose polystyrene (GPPS) polymerization by using program referring to the existing data from specific commercial polystyrene plant, Thai Styrenics Co., Ltd.. To match this model, optimization was needed to find the best value of kinetic constant, such as propagation constant and

termination constant. Thereafter, the model matching was made by adjusting the kinetic constant of polymerization. The simulation results showed accurately predictive data with fewer than 10% errors of the real data. The kinetic constant of propagation step was $10,902,975 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ and the kinetic constant of termination was $1,255,000,000 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$. The result of the simulate model showed that, at higher temperature in reactors, the average molecular weight was lower but the yield was higher.

Keywords : polymerization, polystyrene

1. บทนำ

อุตสาหกรรมพอลิเมอร์เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ มีการพัฒนาและใช้งานพอลิเมอร์มากขึ้นในหลายประเทศ ปัจจุบันปริมาณการผลิตพอลิเมอร์มีมากกว่าเหล็ก (Stepito, 2003) พอลิสไตรีนที่เป็นพอลิเมอร์ตัวหนึ่งที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไป มีนักวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาของพอลิสไตรีน Flory (Flory, 1937) เป็นคนแรกที่เสนอว่ากระบวนการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลของ สไตรีน จำนวน 2 ตัว แล้วกลายเป็น diradical จากการวิเคราะห์แล้วพบว่าเกิด diradical เป็นการเกิดที่เร็วมากและเป็นการเริ่มของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ต่อมา Mayo (Mayo, 1961) เป็นผู้เสนอ mechanism สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เริ่มจากขั้นตอนแรกคือเกิดปฏิกิริยา dimerization ต่อมา diradical ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสไตรีนตัวที่ 3 แล้วได้ radical สองตัวที่จะเป็น initiation ของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน การเกิด propagation และการเกิดเทอร์มินชันทั้งนี้ Hui และ Hamielec (Hui, 1972) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสไตรีน ในช่วงอุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียสและค่า conversion ตั้งแต่ 0 ถึง 100 พวกเขา

แสดงให้เห็นว่ามีค่าคงที่ สำหรับแต่ละขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา โดยที่

ค่าคงที่นี้ไม่ขึ้นกับขนาดของความยาวของสายโซ่ แต่ขึ้นกับค่า conversion ค่าคงที่นี้มีความเกี่ยวข้องกับ gel effect ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการศึกษาปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสไตรีน

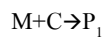
สำหรับกระบวนการผลิตพอลิสไตรีนเกรดการใช้งานทั่วไปในโรงงานนี้เป็นกระบวนการที่ใช้เทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization) โดยที่มีขั้นตอนดังนี้คือ เริ่มจากขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในถังปฏิกรณ์ (Reactor Polymer) สไตรีนมอนอเมอร์จะถูกป้อนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ R1 หลังจากนั้นจะเติมสารเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในถังแล้วกวนให้เข้ากัน พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะถูกปั๊มไปยังถังปฏิกรณ์ขั้นที่ 2 ต่อไปเป็นขั้นตอนการลดปริมาณสารระเหยตกค้าง (Residual Volatile Removal) โดยเข้าสู่ถังลดปริมาณสารระเหย DV1 และ ถังลดปริมาณสารระเหยถึงที่ 2 DV2 สารที่อยู่ด้านล่างของ Stripper จะปั๊มกลับมายัง R2 ส่วนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะถูกปั๊มออกไปด้วย Die Pump เพื่อส่งไปยังหน่วยตัดเม็ดต่อไป

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์-
เซชันของพอลิสไตรีน ดังนี้ (Albright, 1985)

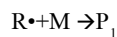
Thermal initiation



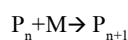
Induced initiation



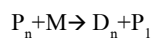
Chain initiation



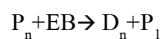
Propagation



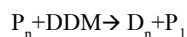
Chain transfer to monomer



Chain transfer to EB



Chain transfer to DDM



Termination by combination $P_n + P_m \rightarrow P_{n+m}$

นอกจากนี้มีการรายงาน (Albright, 1985) ว่า สำหรับขั้นตอนการหยุดการเกิดปฏิกิริยา (Termination) จะเป็นแบบเทอร์มินชันแบบรวมตัว (combination) มากกว่าเป็นแบบเทอร์มินชันแบบแตกตัว (disproportionation)

2. วัตถุประสงค์

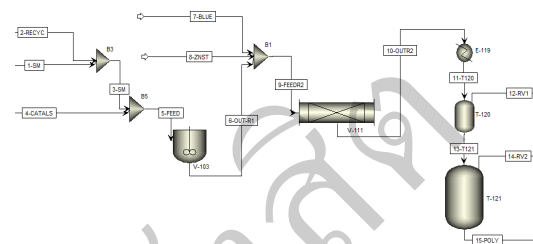
1. สร้างแบบจำลองของกระบวนการผลิตพอลิ
สไตรีน เพื่อนำมาทำนายแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาที่
สภาวะต่างๆ

2. ทำการหาค่าคงที่ kinetic ที่มีความสอดคล้องกับค่าจริงของโรงงานมากที่สุด

3. อุปกรณ์และวิธีการ

สำหรับโปรแกรมจะใช้โปรแกรม Aspen ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตพอลิสไตรีนชนิดการใช้งานทั่วไปหรือ GPPS (General Purpose Polystyrene) โดยใช้สมการการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นค่าโดยปริยาย (default) ของโปรแกรมที่สภาวะคงตัว (steady state)

จากนั้นทำการปรับแต่งแก้ไขจนได้แบบจำลองตาม
แผนภาพ ตามรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตที่เขียนในโปรแกรม

แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าจริง ได้แก่ค่า k_p น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและค่า Conversion ทำการปรับให้สอดคล้องกับข้อมูลโดยปรับค่าคงที่ k ให้ใกล้เคียงค่าจริง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของ kinetic ได้แก่ค่าคงที่ของการเกิด propagation และการเกิด termination ซึ่งปัจจุบันค่าโดยปริยายของโปรแกรมจะมีค่าดังรูปภาพที่ 2 ตามสมการกลไกการเกิดปฏิกิริยาในรูปภาพที่ 3

Type	Comp 1	Comp 2	Pre-Exp	Act-Energy
			1/sec	J/kmol
INIT-DEC	TBP		1.622E+11	115300000
INIT-SP	STY	CINI	438000	114800000
CHAIN-INI	STY		10510000	29570000
PROPAGATION	STY	STY	10510000	29570000
CHAT-MON	STY	STY	3310000	53020000
CHAT-AGENT	STY	EB	1051	29590000
CHAT-AGENT	STY	DDM	1051	29590000
TERM-COMB	STY	STY	1255000000	7017000

รูปภาพที่ 2 แสดงค่าคงที่ Kinetic

Reaction	Reactants		Products	
1) Init-dec	Tbp		$\rightarrow$ e.n.R*	+ a.A + b.B
2) Init-sp	Sty	+ Cini	$\rightarrow$ P1[Sty-seg]	+ a.A + b.B
3) Chain-ini	Sty	+ R*	$\rightarrow$ P1[Sty]	
4) Propagation	Pn[Sty]	+ Sty	$\rightarrow$ Pn+1[Sty]	
5) Chat-mon	Pn[Sty]	+ Sty	$\rightarrow$ (1-f).Dn + f.Dn=	+ P1[Sty]
6) Chat-agent	Pn[Sty]	+ Eb	$\rightarrow$ Dn	+ R*
7) Chat-agent	Pn[Sty]	+ Ddm	$\rightarrow$ Dn	+ R*
8) Term-comb	Pn[Sty]	+ Pm[Sty]	$\rightarrow$ Dn+m	

รูปภาพที่ 3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จากนั้นทำการปรับค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาขั้น Propagation และ Termination เพื่อเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักโมเลกุลและค่า Yield นำไป plot กราฟ แล้วคำนวณหาค่า K ที่จะได้ค่าน้ำหนักโมเลกุลตามที่ตั้งไว้สำหรับแต่ละเกรด หรือให้ได้ค่า Yield ตามที่ต้องการ จากนั้นจะทำการเปลี่ยนอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ R1 ที่ 120 126 130 135 และ 140 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ R2 ที่ 140 148 และ 150 องศาเซลเซียส แล้วดูผลกระทบที่มีต่อค่าน้ำหนักโมเลกุลและค่า Yield ของผลิตภัณฑ์

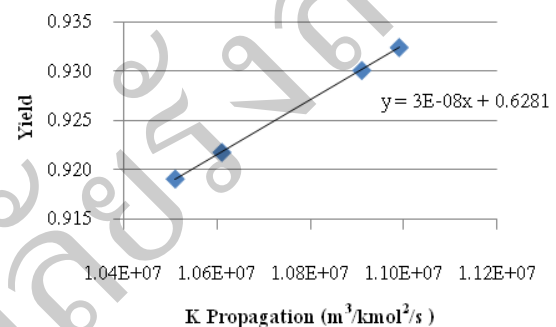
4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาขั้น Propagation โดยที่คงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาขั้น Termination ไว้ให้อยู่ที่ 1,255,000,000 $\text{m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ ได้ผลตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนค่า K Propagation กับค่า Yield และค่าน้ำหนักโมเลกุล

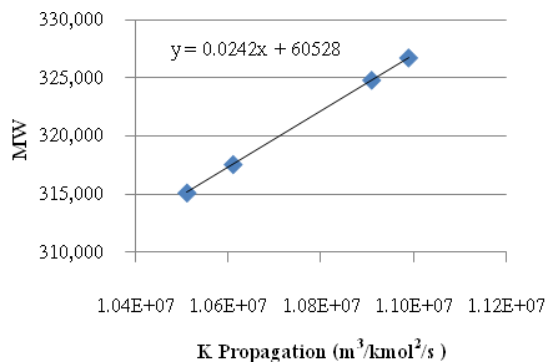
ค่า K Propagation ($\text{m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$)	PS (Kg/hr)	Yield	MW
10,510,000	5,541	0.919	315,142
10,610,000	5,559	0.922	317,587
10,910,000	5,609	0.930	324,852
10,990,000	5,623	0.932	326,772

เมื่อนำค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของขั้น Propagation และค่า Yield ในตารางที่ 1 ไปวาดกราฟตามรูปภาพที่ 4 แล้วคำนวณจะพบว่าที่ค่า Target Yield = 0.962 จะได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของขั้น Propagation อยู่ที่ 13,786,667 $\text{m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ ซึ่งเมื่อใส่ลงในโปรแกรมแสดง “EO Solution Fail” จึงไม่พิจารณาค่านี้มาใช้



รูปภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ค่า K Propagation กับค่า Yield

จากนั้นนำค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาขั้น Propagation และค่าน้ำหนักโมเลกุลในตารางที่ 1 ไปวาดกราฟตามรูปภาพที่ 5 แล้วคำนวณจะพบว่าที่ค่า Target MW = 324,380 จะได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของขั้น Propagation อยู่ที่ 10,902,975 $\text{m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ ซึ่งเมื่อใส่ลงในโปรแกรมแล้วสามารถรันได้ จึงสรุปว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาขั้น Propagation ที่เหมาะสมคือค่า 10,902,975 $\text{m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ แม้ว่าจะทำการละเลยค่าที่ทำให้ได้ Yield ที่ดีที่สุดจากการพิจารณาค่าของความคลาดเคลื่อนของ Yield พบว่าคลาดเคลื่อนไปประมาณ 3% ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มาก ยอมรับได้



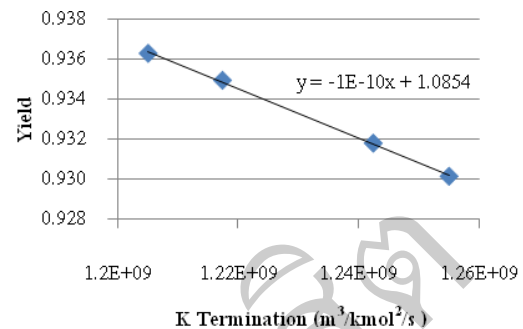
รูปภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ค่า K Propagation กับค่า MW

ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าที่ขึ้น Termination โดยที่ค่าค่าที่ขึ้น Propagation = $10,902,975 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ ได้ผลตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนค่า K Termination กับค่า Yield และค่าน้ำหนักโมเลกุล

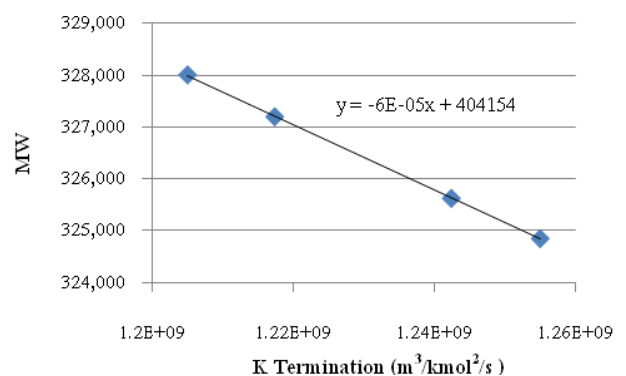
ค่า K Termination ($\text{m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$)	PS (Kg/hr)	Yield	MW
1,255,000,000	5,609	0.930	324,852
1,242,400,000	5,619	0.932	325,630
1,217,350,000	5,638	0.935	327,207
1,205,000,000	5,646	0.936	328,015

เมื่อนำค่าที่ขึ้นของการเกิดปฏิกิริยาขึ้น Termination และค่า Yield ในตารางที่ 2 ไปวาดกราฟตามรูปภาพที่ 6 แล้วคำนวณจะได้พบว่าที่ค่า Target Yield = 0.962 จะได้ค่าที่ขึ้นของการเกิดปฏิกิริยาของขึ้น Termination $1,171,000,000 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ ซึ่งเมื่อใส่ลงในโปรแกรมแล้วโปรแกรมแสดง “EO Solution Fail”



รูปภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ค่าที่ขึ้นของการเกิดปฏิกิริยาของขึ้น Termination กับค่า Yield

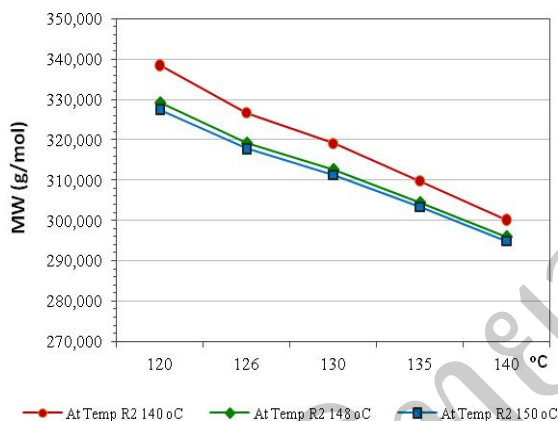
จากนั้นนำค่าที่ขึ้นของการเกิดปฏิกิริยาขึ้น Termination และค่า MW ในตารางที่ 2 ไปวาดกราฟตามรูปภาพที่ 7 แล้วคำนวณตามสมการจะพบว่าที่ค่า Target MW = 324,380 จะได้ค่าค่าที่ขึ้นของการเกิดปฏิกิริยาของขึ้น Termination = $1,329,566,667 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ ซึ่งเมื่อใส่ลงในโปรแกรม แสดง “EO Solution Fail”



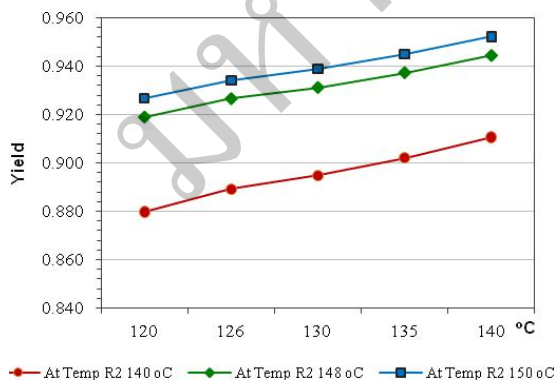
รูปภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ค่า K Termination กับค่า MW

เนื่องจากค่าที่ดีที่สุดไม่สามารถทำให้ได้ค่า Yield และค่าน้ำหนักโมเลกุลตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ค่าเดิมของโปรแกรมคือค่า $1,255,000,000 \text{ m}^3/\text{kmol}^2/\text{s}$ เมื่อนำค่า

เดิมของโปรแกรมมาพิจารณาให้ดีจะพบว่าสามารถยอมรับค่านี้ได้เนื่องจากค่าความผิดพลาดของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 0.15% ส่วนค่า Yield เคลื่อนไป 3.3% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยยอมรับได้ จากนั้นทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในถึงปฏิกรณ์ R1 และ R2 ที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลและค่า Yield ของพอลิไตรีนของผลิตภัณฑ์ จะได้กราฟดังรูปภาพที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ต่ออุณหภูมิใน ถึงปฏิกรณ์ R1 และ R2



รูปภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของ Yield ต่ออุณหภูมิในถึงปฏิกรณ์ R1 และ R2

5. การอภิปรายผล

เนื่องจากมีนักวิจัยการให้ความสนใจในการประยุกต์นำ multi-function initiator มาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของ free radical มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมทาง kinetic ของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสไตรีนเพิ่มขึ้น ข้อดีของการใช้ multi-function initiator คือสามารถลดระยะเวลาในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันและเพิ่มความสามารถในการควบคุมน้ำหนักโมเลกุล Villalobos (Villalobos, 1991) ได้ทำการพัฒนาโมเดล kinetic สำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันโดยใช้ bi-functional initiator จำนวน 3 ชนิด เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง bi-functional initiators และ mono-functional initiator ได้ข้อสรุปว่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลถูกควบคุมโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ bi-functional initiator

ในอนาคตสามารถนำงานนี้ไปเป็นงานต้นแบบในการพัฒนาต่อเพื่อหาขอบเขตหรือขีดจำกัดของการผลิตพอลิไตรีนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา mono-functional initiator ศึกษาว่าการเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถเพิ่มค่าน้ำหนักโมเลกุลได้สูงสุดเท่าไร ไว้ในสำหรับการพัฒนาเกรดอื่นๆต่อไปในอนาคต อีกทั้งยังสามารถนำไปพิจารณาถึงการเปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เป็นแบบ multi-functional initiator พร้อมทั้งหาสถานะในการผลิตใหม่ที่เหมาะสมด้วย โดยการเปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อแบบจำลองเพื่อทำนายน้ำหนักโมเลกุลนี้เนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้สมการกลไกการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป แบบจำลองนี้จะมีประโยชน์ในการใช้สำหรับเป็นแนวทางได้เท่านั้น

6. บทสรุป

จากการสร้างโมเดล แล้วป้อนค่าสถานะต่างๆต่างค่าจริงของโรงงานเสร็จแล้วได้ทำการตรวจสอบค่าที่ออกมาในตำแหน่งต่างๆได้แก่ค่า Conversion ที่ออกจาก R1 วัดจริงได้ 43% ส่วนค่าจากโปรแกรมได้ 47% คลาดเคลื่อนไป 9% ส่วนอีกค่าคือค่า MW ค่าจากโปรแกรมได้ 324,684 ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับค่าจริงมาก คลาดเคลื่อนไปเพียง 0.093% (ค่าจริงอยู่ที่ประมาณ 324,380) จากการเปลี่ยนค่าคงที่ของปฏิกิริยา Propagation พบว่าเมื่อเพิ่มค่าคงที่ของปฏิกิริยา Propagation จะทำให้ค่าน้ำหนักโมเลกุลและค่า Yield เพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มค่าคงที่ของปฏิกิริยา Termination จะทำให้ค่าน้ำหนักโมเลกุลลดลงและทำให้ค่า Yield เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิถึงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิस्टาไรินลดลง เนื่องจากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะไปเพิ่มโอกาสในการตัด chain ทำให้พอลิเมอร์มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง แต่ทำให้ค่า Yield เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมคืออุณหภูมิที่ทำให้ได้ค่าน้ำหนักโมเลกุลตามต้องการของโรงงาน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศ.ดร. ไพศาล กิตติสุขกร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยแนะนำให้ความรู้ คำปรึกษาในการทำวิจัยในครั้งนี้ ทั้งนี้ขอขอบคุณคุณช้อย จุฬอง ผู้จัดการบริษัท ไทยสไตรีนิกส์ จำกัด และคุณสกนธ์ ดันสุรัตน์ วิศวกรอาวุโสหน่วยงานเทคนิค บริษัท ปตท. โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

8. เอกสารอ้างอิง

- Albright, L. F. (1985). *Processes for Major Addition-Type Plastics and Their Monomers*. Krieger Publishing Co.
- Flory, P. J. (1937). The Mechanism of Vinyl Polymerizations. *Journal of the American Chemical Society*. 59 (2): 241-253.
- Hui, A. W. and Hamielec, A. E. (1972). *Thermal Polymerization of Styrene at High Conversion and Temperatures. An Experimental Study*. An Experimental Study. 16 : 749-769.
- Mayo, F. R. (1961). *Polymer Preparation.*, American Chemical Society. Div. Polym. Chem. 2 : 55.
- Stepito, K., Horie, K., Kitayama, T., and Abe, A. (2003). *Mission and challenges of polymer science and technology*. Pure Applied Chemistry. 75 (10): 1359–1369.
- Villalobos, M. A., Hemielec, A. E. and Wood, P. E. (1991). Kinetic Model for Short-Cycle Bulk Styrene Polymerization through Bifunctional Initiators. *Journal of Applied Polymer Science*. 42 : 629-641.