



## การไฮดรอกซิไลซ์เบนซีนไปเป็นฟีนอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1 ที่อุณหภูมิสูง Hydroxylation of Benzene to Phenol over TS-1 Catalyst at Elevated Temperature

ธราธร มงคลศรี\* และ ศราวดี มิตรพระพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0-2218-6882 E-mail: tharathon.m@chula.ac.th

Tharathon Mongkhonsi\* and Sarawadee Mitpapan

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phayathai Road, Bangkok 10330, THAILAND. E-mail: tharathon.m@chula.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการสังเคราะห์ฟีนอลจากเบนซีนในขั้นตอนเดียวด้วยปฏิกิริยาการไฮดรอกซิไลต์เบนซีนด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมซิลิกาไลต์-1 (TS-1) ในเครื่องปฏิกรณ์ 3 เฟสแบบปั่นกววนภายใต้ความดัน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงกว่าจุดเดือดของเบนซีนที่ความดันบรรยากาศซึ่งสูงกว่าของงานวิจัยอื่นที่มีการทำมาก่อนหน้า การทดลองกระทำโดยการปรับเปลี่ยนปริมาตรน้ำที่ใช้เป็นตัวกลาง ปริมาณเบนซีนที่ใช้เป็นสารตั้งต้น และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณเบนซีนที่สามารถละลายเข้าไปในเฟสน้ำเป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้าได้มากน้อยเท่าใด ซึ่งการเพิ่มปริมาณเบนซีนในเฟสน้ำทำได้โดย (ก) การเพิ่มปริมาตรน้ำที่ใช้เป็นตัวกลาง และ (ข) ใช้เบนซีนในปริมาณที่มากพอที่จะปกคลุมผิวบนของชั้นน้ำเอาไว้ได้หมดตลอดระยะเวลาการทำปฏิกิริยา เพื่อป้องกันไม่ใ้เบนซีนที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำระเหยออกสู่เฟสแก๊สด้านบน

**คำสำคัญ** การไฮดรอกซิไลต์, เบนซีน, ฟีนอล, ไทเทเนียมซิลิกาไลต์-1

### Abstract

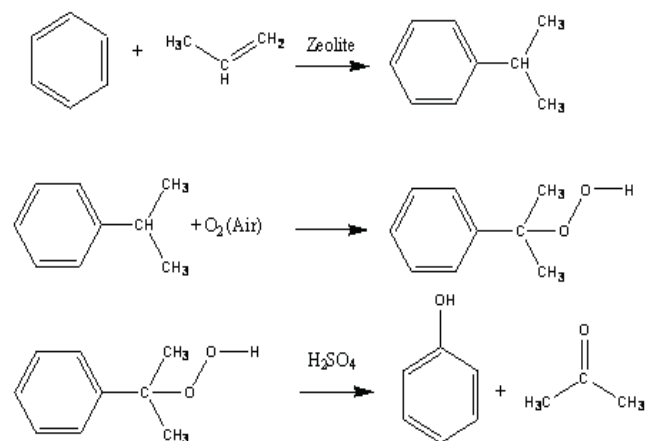
This research presents the results of the synthesis of phenol from benzene in a one step reaction by the hydroxylation of benzene with hydrogen peroxide over titanium silicalite-1 (TS-1) catalyst. The reaction is carried out in a pressurised 3-phase stirred reactor at reaction temperatures higher than the normal boiling point of benzene at atmospheric pressure which are higher than the reaction temperatures used in any previous researches. The experiment is carried out by varying volume of water used as solvent, volume of benzene used as reactant, and reaction temperature. The results reveal that the amount of benzene can be dissolved into the water phase is the factor determining how far the reaction can go forward. The amount of benzene dissolved into the water phase can be increased by (a) increasing the volume of water used as solvent and (b) use benzene in an adequate volume which can completely cover the top surface of the of the water layer all over the reaction period in order to prevent benzene already

dissolved into the water phase vaporized back to the gaseous phase.

**Keywords:** hydroxylation, benzene, phenol, titanium silicalite-1, TS-1

### 1. บทนำ

ฟีนอล ( $C_6H_5OH$ ) เป็นเคมีภัณฑ์ที่สำคัญตัวหนึ่งของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ฟีนอลถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารตั้งต้นในการผลิตบิสฟีนอลเอ (bis-phenol A) ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิคาร์บอเนตและเรซินในกลุ่มอีพอกซี พลาสติกจำพวกเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น กระบวนการหลักที่ใช้ในการผลิตฟีนอลในปัจจุบันคือกระบวนการคิวมิน (Cumene process รูปที่ 1) กระบวนการคิวมินนี้เริ่มจากการนำเบนซีน ( $C_6H_6$ ) มาทำปฏิกิริยากับโพรพิลีน ( $C_3H_6$ ) เพื่อสังเคราะห์เป็นคิวมิน ( $C_6H_5-CH(CH_3)_2$ ) จากนั้นจึงทำการออกซิไดซ์คิวมินให้กลายเป็นคิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ( $C_6H_5-C(CH_3)_2OOH$ ) ตามด้วยการทำให้คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์สลายตัวเป็นฟีนอลและอะซิโตน ( $H_3CCOCH_3$ )

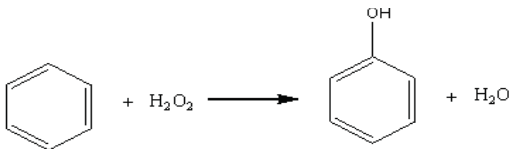


**รูปที่ 1** กระบวนการคิวมินที่เป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในการผลิตฟีนอลในปัจจุบัน

ข้อเสียหลักของกระบวนการควมินคือ (ก) ประกอบด้วยกระบวนการย่อยหลายกระบวนการ (ข) ต้องทำการสังเคราะห์สารประกอบเปอร์ออกไซด์ขึ้นมาก่อน ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร ก่อให้เกิดอันตรายจากการสลายตัวได้ และ (ค) ความต้องการอะซิโตนที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของตลาดไม่ได้เพิ่มขึ้นตามความต้องการฟีนอล ทำให้เกิดปัญหาการหาทางระบาย อะซิโตน

เมื่อพิจารณาในแง่โครงสร้างทางเคมีแล้วจะเห็นว่าฟีนอลมีความแตกต่างจากเบนซินเพียงแค่มีกาแทนที่อะตอมไฮโดรเจนหนึ่งอะตอมของวงแหวนเบนซินด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ดังนั้นถ้าสามารถทำการแทรกหมู่ไฮดรอกซิลไปที่วงแหวนเบนซินได้โดยตรง ก็จะทำให้สามารถผลิตฟีนอลจากเบนซินได้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งจะทำได้จะทำให้สามารถลดความซับซ้อนของกระบวนการผลิตและตัดปัญหาการผลิตผลิตภัณฑ์ร่วมที่ตลาดไม่ได้มีความต้องการสูง

ในปีค.ศ. 1983 Taramasso และคณะ [1] ได้จดสิทธิบัตรตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมซิลิกาไลต์-1 (Titanium Silicalite-1) หรือที่นิยมเรียกย่อว่า TS-1 ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีลักษณะโครงสร้างแบบซิลิกาไลต์ที่มีการแทนที่ไอออน  $Si^{4+}$  บางตำแหน่งด้วยไอออน  $Ti^{4+}$  และคณะวิจัยนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถทำการออกซิไดซ์เบนซินให้กลายเป็นฟีนอลได้ในขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า  $70^{\circ}C$ ) โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาการไฮดรอกซิไลซ์เบนซินไปเป็นฟีนอลในขั้นตอนเดียว

แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวยังให้ค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการคือ สาเหตุประการแรกคือระบบการทำปฏิกิริยาเป็นระบบแบบ 3 เฟส กล่าวคือมีเฟสตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง เฟสสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นเฟสของเหลวมีขี้ (สารละลายในน้ำ) และเฟสเบนซินที่เป็นเฟสของเหลวไม่มีขี้ที่ลอยอยู่บนผิวบนของเฟสสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้นั้นจำเป็นต้องหาทางทำให้ทั้งโมเลกุลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโมเลกุลเบนซินมาอยู่บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ในเวลาเดียวกัน

สาเหตุประการที่สองคือธรรมชาติของพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1 ที่ชอบดูดซับโมเลกุลไม่มีขี้มากกว่าโมเลกุลมีขี้ ดังนั้นถ้าหากตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1 มีโอกาสสัมผัสกับเบนซินมากเกินไป (แม้จะในปริมาณเล็กน้อย) ก็จะทำให้พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเกือบทั้งหมดถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลเบนซิน ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนเบนซินไปเป็นฟีนอลลดลงเพราะโมเลกุลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่สามารถลงไปเกาะบนพื้นผิวได้

เมื่อพิจารณาในแง่ของสารตั้งต้นแล้ว ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นสารตั้งต้นที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงพิจารณาประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาโดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มค่าการเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์เป็นหลัก

ที่ผ่านมาได้มีการนำแนวทาง 3 แนวทางมาใช้ในการเพิ่มค่าการเปลี่ยนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์ แนวทางแรกได้แก่การเพิ่มสัดส่วนเบนซินที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น แต่วิธีการนี้ก็ไม่ได้แก้ปัญหาเรื่องการผสมกันระหว่างเฟส 3 เฟส แนวทางที่สองแก้ปัญหาด้วยการใช้ตัวทำละลายประสานเฟสของเหลวมีขี้และเฟสของเหลวไม่มีขี้เข้าด้วยกัน ทำให้ระบบการทำปฏิกิริยาเหลือเพียงสองเฟสคือ เฟสตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง และเฟสสารตั้งต้นที่เป็นของเหลว แต่แนวทางดังกล่าวก็ทำให้เกิดปัญหาอื่นตามมาเช่น ค่าการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากตัวทำละลายจะเข้าไปแย่งดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เหลือพื้นที่ผิวสำหรับสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาลดลง ปัญหาการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายที่ใช้ประสานเฟสและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นสารออกซิไดซ์และปัญหาการแยกและนำกลับตัวทำละลายมาใช้งานใหม่

ส่วนแนวทางที่สามได้แก่การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่พื้นผิวมีความชอบโมเลกุลมีขี้มากขึ้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปเกาะบนพื้นผิวได้มากขึ้น [2] แต่แนวทางดังกล่าวก็ยังประสบกับปัญหา ค่าการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังคงต่ำอยู่

งานวิจัยที่นำเสนอขึ้นเกิดขึ้นจากการสังเกตพบว่า ในบรรดางานวิจัยที่ได้มีการกระทำกันมาก่อนหน้านั้นโดยเฉพาะระบบการทำปฏิกิริยาแบบ 3 เฟส แม้ว่า จะปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อเนื่องไปเป็นระยะเวลาต่างก็ให้ค่าการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต่ำ กล่าวคือปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยาไปเป็นฟีนอลได้มีค่าไม่เกิน 20% และเป็นเรื่องปกติที่จะได้ค่าต่ำกว่า 10% [3] ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีปัจจัยอื่นอีกที่เป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้าได้มากน้อยเท่าใด ดังนั้นถ้าสามารถระบุปัจจัยดังกล่าวได้ก็จะทำให้สามารถเพิ่มค่าการเปลี่ยนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นด้วยว่าเมื่อมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีรูปร่างและระบบการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะทำปฏิกิริยาในภาวะเดียวกันหรือคล้ายคลึงกัน ต่างก็ให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน ปัญหานี้ทำให้การเปรียบเทียบผลการทดลองที่มีการรายงานไว้ในบทความต่าง ๆ กระทำได้ยาก อีกประเด็นที่สังเกตพบคือในรายงานต่าง ๆ นั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะใช้ไม่เกิน  $70^{\circ}C$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือดของเบนซินที่อุณหภูมิห้อง [3]

งานวิจัยที่นำเสนอนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาทางเพิ่มค่าการเปลี่ยนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นฟีนอล โดยเริ่มจากการระบุปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดว่าจะให้ผลการทดลองออกมาเช่นไร ระบบที่เลือกใช้ในการทดลองนั้นเป็นระบบ 3 เฟสที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา เหตุผลที่เลือกระบบนี้เพราะเมื่อพิจารณาจากมุมมองในแง่โอกาสการขยายขนาดแล้วระบบดังกล่าวจะเป็นระบบที่มีความเรียบง่ายที่สุดและมีค่าใช้จ่ายต่ำสุด เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการใช้ตัวทำละลายประสานเฟส ทำให้สามารถตัดระบบแยกตัวทำละลายกลับมาใช้งานใหม่ออกไปได้

แนวทางการทำงานของงานวิจัยนี้คือการเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาให้สูงกว่าที่เคยใช้กันมา ซึ่งทำได้เมื่อเพิ่มความดันภายในระบบทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไม่เพียงแต่จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ยังคงช่วยเพิ่มค่าการละลายของเบนซินในน้ำด้วย [4] ซึ่งทั้งสองปัจจัยควรจะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นฟีนอลสูงขึ้นด้วย

## 2. การทดลอง

### 2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์

ตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1 เตรียมโดยเทคนิคการตกผลึกอย่างรวดเร็ว (Rapid crystallization) [5-7] ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองเตรียมขึ้นจากสองแบดซ์ที่มีปริมาณ Ti แตกต่างกันเล็กน้อย (TS-1(b1) และ TS-1(b2)) แต่ในการเปรียบเทียบภาวะการทำปฏิกิริยานั้นจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากแบดซ์เดียวกัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เทคนิค X-ray fluorescence (XRF) วัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (BET) การระบุโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ใช้เทคนิค X-ray diffraction (XRD) และ Fourier transform infrared (FT-IR)

การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ต่าง ๆ (เบนซีน ฟีนอล และผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นจากการแทนที่ด้วยหมู่ -OH มากกว่าหนึ่งหมู่) ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC-9A) ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Flame ionisation detector คอลัมน์ที่ใช้เป็นคอลัมน์แก้วยาว 1.8 m บรรจุด้วย GP10% SP2100 อุณหภูมิที่ใช้วิเคราะห์เริ่มจาก 70°C ไปจนถึง 250°C ด้วยอัตราการเพิ่ม 6°C/min ซึ่งอุณหภูมิคอลัมน์ดังกล่าวสูงเพียงพอที่จะตรวจวัดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ถ้าเกิด) ที่มีจุดเดือดสูงกว่าฟีนอล

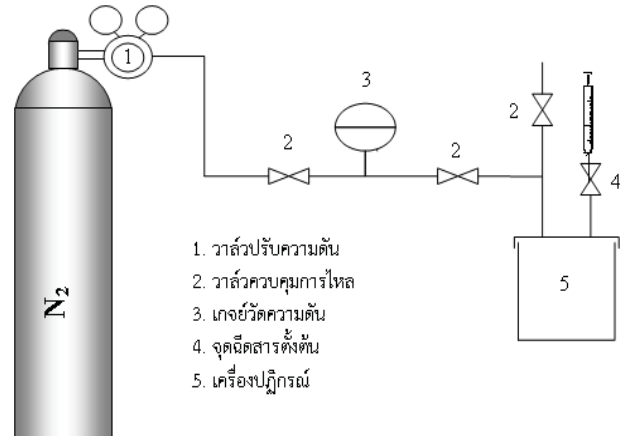
### 2.2 การวัดความสามารถในการละลายน้ำของเบนซีน

การวัดความสามารถในการละลายน้ำของเบนซีนเป็นการทดลองที่กระทำขึ้นเพื่อระบุปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นฟีนอล การทดลองกระทำที่อุณหภูมิห้อง (30°C) โดยใส่น้ำกลั่น 160 ml ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml จากนั้นนำท่อโลหะ (OD 1/4") วางจุ่มน้ำลงไปในบีกเกอร์ ท่อนี้ใช้สำหรับเป็นท่อเก็บตัวอย่างน้ำ จากนั้นจึงใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน และเติมเบนซีน (0.78 ml หรือ 7.8 ml) โดยวิธีการนี้จะทำให้น้ำที่อยู่ในท่อโลหะไม่มีเบนซีนลอยอยู่บนผิวหน้า การจับเวลาการทดลองเริ่มจากการเริ่มการปั่นกวน (1000 rpm) เมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้จะหยุดการปั่นกวน รอให้หยดเบนซีนที่กระจายเข้าไปในเฟสน้ำลอยตัวสู่ผิวน้ำด้านบนหมด จากนั้นใช้ลูกยางเป่าไล่น้ำที่อยู่ในท่อโลหะออก 3-4 ครั้งก่อนจึงค่อยเก็บน้ำตัวอย่าง (1 ml) ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเบนซีนที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

### 2.3 การทำปฏิกิริยา

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นชนิดภาชนะความดันทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (SS304) รูปทรงกระบอกมีฝาปิดทางด้านบน เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 52 mm ปริมาตรภายใน 150 ml ในการทดลองจะบรรจุแท่งแม่เหล็กสำหรับกวน ตัวเร่งปฏิกิริยา (1 g) น้ำ (50-120 ml) และเบนซีน (0.78 ml หรือ 7.8 ml ซึ่งเทียบเท่ากับ 0.01 mol และ 0.1 mol ตามลำดับ) จากนั้นจะทำการปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ ทำการอัดความดันด้วยแก๊สไนโตรเจนจนมีความดัน 2 barg และระบายทิ้ง ทำการอัดความดันและระบายทิ้ง 3-4 ครั้งเพื่อไล่อากาศที่ค้างอยู่ในระบบออกไป จากนั้นจึงอัดความดันด้วยแก๊สไนโตรเจนอีกครั้งจนระบบมีความดัน 2 barg และให้ความร้อนแก่เครื่อง

ปฏิกรณ์โดยแช่เครื่องปฏิกรณ์ในอ่างน้ำมันที่วางอยู่บนเครื่องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 70°C ทำการปั่นกวนภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้ทำเพื่อไล่ฟองแก๊สที่อยู่ในรูปพอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ น้ำเข้าไปเติมเต็มรูพอร์ การที่น้ำเข้าไปเติมเต็มรูพอร์จนเต็มจะช่วยให้การแพร่ของโมเลกุล  $H_2O_2$  เข้าไปรูพอร์ และการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงยังช่วยให้เบนซีนละลายเข้าไปในเฟสน้ำจนอิ่มตัว



รูปที่ 3 แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เมื่อเสร็จสิ้นการไล่แก๊สออกจากรูพอร์จะทำการปรับอุณหภูมิระบบไปยังอุณหภูมิที่ต้องการทำปฏิกิริยา (70-110°C) จากนั้นทำการฉีดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30 %wt) 1 ml (เทียบเท่า 0.01 mol) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เข็มขนาด 1 ml ฉีดและเริ่มทำการจับเวลา ความดันในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา หลังจากปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจึงทำการหยุดปฏิกิริยาด้วยการนำเอาเครื่องปฏิกรณ์ออกจากอ่างน้ำมันมาแช่ในอ่างน้ำแข็ง (อุณหภูมิ 0°C) เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงจะทำการระบายความดันในระบบ เปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์และทำการเติมเอทานอล 50 ml เพื่อประสานเฟสน้ำและเบนซีนเข้าด้วยกัน จากนั้นนำของเหลวผสมที่ได้ไปเหวี่ยงแยกเพื่อแยกเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออก เฟสของเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอินทรีย์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การเปรียบเทียบการดำเนินไปข้างหน้าของปฏิกิริยาจะพิจารณาจากการเปลี่ยนของ  $H_2O_2$  ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอินทรีย์ เนื่องจากในผลการทดลองทั้งหมดที่นำมารายงานนั้นตรวจพบเพียงฟีนอลที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นค่าการเปลี่ยนของ  $H_2O_2$  ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอินทรีย์จะรายงานในรูปของ % $H_2O_2$  ที่เปลี่ยนไปเป็นฟีนอล ซึ่งคำนวณได้จากรูปสมการ

$$\%H_2O_2 \text{ ที่เปลี่ยนไปเป็นฟีนอล} = \frac{\text{โมลฟีนอลที่เกิด}}{\text{โมล } H_2O_2 \text{ เริ่มต้น}} \times 100$$

### 3. ผลการทดลองและการอภิปราย

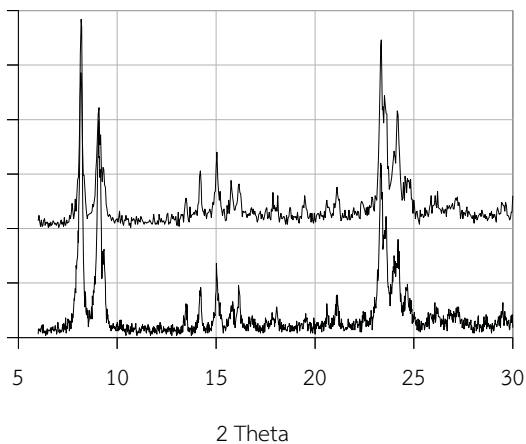
#### 3.1 คุณลักษณะทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณ Si และ Ti และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1(b1) และ TS-1(b2) แสดงไว้ในตารางที่ 1 พึงสังเกตว่าแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองจะมีพื้นที่ผิวในระดับเดียวกัน แต่มีปริมาณโลหะ Ti ที่แตกต่างกันอยู่ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองมีความว่องไวที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ผลการทดลองที่จะรายงานต่อไปจะทำการระบุว่าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใด

ตารางที่ 1 mol% เฉพาะส่วนของไอออนบวกและพื้นที่ผิว BET ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองแบบที่เตรียมขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา	%Si	%Ti	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)
TS-1(b1)	96.42	2.16	351.1
TS-1(b2)	97.03	1.62	362.5

การวิเคราะห์ด้วย FT-IR (ผลไม่ได้นำมาแสดง) พบพีคการดูดกลืนที่เลขคลื่นประมาณ 960 cm<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงโครงสร้าง Ti<sup>4+</sup> ยึดเกาะกับหมู่ SiO<sub>4</sub> ในรูปแบบ O<sub>3</sub>SiOTi [8] การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 4) แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบ MFI ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกตระกูลซีลิกาไลต์



รูปที่ 4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (บน) TS-1(b1) และ (ล่าง) TS-1(b2)

#### 3.2 ผลของปริมาตรน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา

งานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้มีการรายงานมาก่อนหน้านั้นไม่ได้มีการพิจารณาว่าปริมาตรตัวกลางที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะส่งผลอย่างไรต่อการทำปฏิกิริยาบ้าง ในระบบการป้อนกวนเช่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ถ้าพิจารณาในแง่ของการผสมแล้ว การเพิ่มปริมาตรน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางจะทำให้เบนซินที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำอยู่ห่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่จมอยู่ข้างล่างมากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกป้อนกวนให้ลอยขึ้นไปสัมผัสกับเบนซินที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำจะลดลง ซึ่งควรส่งผลให้ %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอลลดลงไปด้วย

แต่ผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 กลับแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรน้ำให้สูงขึ้น %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอลกลับเพิ่มสูงขึ้น แม้ว่าโอกาสที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะลอยขึ้นไปสัมผัสกับเบนซินบนผิวน้ำน้ำจะลดลง ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเบนซินที่ลอยอยู่บนผิวน้ำน้ำไม่ได้เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดว่า H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถทำปฏิกิริยาไปเป็นฟินอลได้มากน้อยเท่าใด เบนซินที่เป็นตัวกำหนดว่า H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถทำปฏิกิริยาไปเป็นฟินอลได้มากน้อยเท่าใดจึงควรต้องเป็นเบนซินที่ละลายเข้าไปอยู่ในเฟสน้ำแล้ว ที่อุณหภูมิหนึ่งนั้นความเข้มข้นของเบนซินในน้ำจะมีเพียงค่าเดียว ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาตรน้ำที่ใช้ ปริมาณเบนซินที่ละลายอยู่ในน้ำ (ซึ่งเท่ากับผลคูณระหว่างความเข้มข้นของเบนซินในเฟสน้ำกับปริมาตรน้ำ) ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น

ตารางที่ 2 ผลของปริมาตรน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 70°C และ 90°C (ตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1(b1) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 ml เบนซิน 0.78 ml)

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาตรน้ำ (ml)	%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอล
70	50	13.13
	90	21.86
90	50	6.84
	90	15.35

ผลการทดลองในตารางที่ 2 ยังมีจุดที่น่าสนใจอีกจุดหนึ่งคือ ที่ปริมาตรน้ำเดียวกัน แต่เมื่อใช้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้นกลับพบว่า %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอลลดลง แม้ว่าในทางทฤษฎีนั้นเบนซินควรจะละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งควรส่งผลให้ %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอลเพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุผลจะอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

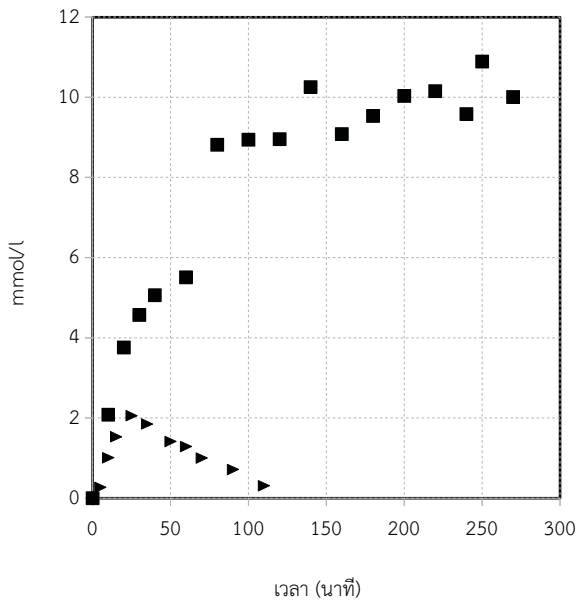
#### 3.3 การวัดความเข้มข้นของเบนซินที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำ

เบนซิน (จุดเดือด 80.1°C) เป็นสารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิเดียวกัน ความดันไอของเบนซินจะสูงกว่าความดันไอน้ำ ในระบบปิดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้นเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้กับเครื่องปฏิกรณ์ทั้งเบนซินและน้ำจะระเหยกลายเป็นไอเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดสมดุล แต่เบนซินจะระเหยกลายเป็นไอมากกว่าน้ำเพราะเบนซินมีจุดเดือดที่ต่ำกว่า ในระบบที่บรรจุเบนซินในปริมาตรที่เท่ากัน ระบบที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะเหลือเบนซินที่คงค้างในเฟสของเหลวน้อยกว่า นอกจากนี้ระบบที่มีปริมาตรที่วางเหนือผิวของเหลวมากก็จะทำให้เบนซินที่เป็นเฟสของเหลวต้องระเหยกลายเป็นไอมากขึ้นเพื่อให้ความดันไอสูงขึ้นจนถึงค่าสมดุล

ในระบบที่ไม่มีการป้อนกวนนั้น เมื่อเติมเบนซินลงไปบนผิวน้ำ พื้นผิวบนสุดของน้ำจะถูกปกคลุมเอาไว้ด้วยเบนซินเหลวทั้งหมด แต่ในระบบที่มีการป้อนกวนนั้น ชั้นเบนซินที่เป็นเฟสของเหลวบนผิวน้ำชั้นน้ำจะถูกป้อนกวนให้แตกกระจายเป็นหยดของเหลวกระจายตัวในเฟสน้ำ ในกรณีที่เบนซินมีปริมาณไม่มากพอ ชั้นผิวบนสุดของน้ำจะไม่ถูกปกคลุมเอาไว้ทั้งหมดด้วยเบนซินที่เป็นเฟสของเหลว โดยจะมีพื้นผิวส่วนหนึ่งสัมผัสกับอากาศโดยตรง ซึ่งพื้นผิวส่วนนี้เป็นส่วนที่เปิดโอกาสให้เบนซินที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำแล้วสามารถระเหยออกไปจากระบบได้

ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของเบนซินที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำที่เวลาต่าง ๆ กันเปรียบเทียบระหว่างการใช้เบนซิน 0.78 ml (ซึ่งไม่เพียง

พอที่จะปิดคลุมพื้นผิวบนสุดของชั้นน้ำเอาไว้ทั้งหมดในระหว่างการปั่นกวน) กับ 7.8 ml (ซึ่งเป็นปริมาตรที่เพียงพอที่จะปิดคลุมพื้นผิวบนสุดของชั้นน้ำเอาไว้ทั้งหมดในระหว่างการปั่นกวน) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ใช้เบนซีน 0.78 ml นั้น ในช่วงแรกความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดประมาณ 2 mmol/l แล้วค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แต่เมื่อใช้เบนซีน 7.8 ml กลับพบว่าความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนเข้าถึงค่าสมมูลที่ความเข้มข้นประมาณ 10 mmol/l



รูปที่ 5 ความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสน้ำ เมื่อใช้เบนซีน 0.78 ml (●) และ 7.8 ml (■)

การที่เมื่อใช้เบนซีน 0.78 ml แล้วเห็นความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแล้วลดลงแสดงให้เห็นว่าเบนซีนที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำนั้นสามารถระเหยออกสู่อากาศได้ เพราะในระหว่างการปั่นกวนนั้น เบนซีนเพียง 0.78 ml ไม่สามารถปกคลุมผิวบนสุดของชั้นน้ำไว้ได้ทั้งหมด และในระหว่างการทดลองเมื่อเบนซีนที่เป็นของเหลวที่อยู่ลอยบนผิวหน้าชั้นน้ำระเหยออกไป พื้นผิวบนสุดของน้ำที่สัมผัสกับชั้นอากาศโดยตรงจะเพิ่มมากขึ้น อัตราการระเหยของเบนซีนที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำออกไปยังอากาศก็จะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เห็นความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสน้ำลดลง

แต่เมื่อใช้เบนซีน 7.8 ml นั้น พื้นผิวบนสุดของชั้นน้ำจะถูกปกคลุมเอาไว้ทั้งหมดด้วยชั้นเบนซีนที่เป็นของเหลวตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ทำให้เบนซีนที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำแล้วไม่สามารถที่จะระเหยออกไปยังอากาศได้โดยตรง จึงทำให้เห็นความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสน้ำเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสมมูล

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าเพื่อให้ความเข้มข้นของเบนซีนในเฟสน้ำนั้นมีค่ามากที่สุด (ค่าสมมูล ณ อุณหภูมินั้น) ปริมาณเบนซีนที่ใช้จึงต้องมากพอที่จะปกคลุมผิวชั้นน้ำเอาไว้ได้ทั้งหมดในระหว่างการทำปฏิกิริยา และเมื่อ

มีเบนซีนเพียงพอที่จะปกคลุมผิวหน้าเอาไว้ทั้งหมดในระหว่างทำปฏิกิริยา ค่าการเปลี่ยนของ  $H_2O_2$  ไปเป็นฟินอลจึงไม่ควรขึ้นอยู่กับปริมาณเบนซีนที่ใส่เข้าไป

เพื่อเป็นการทดสอบสมมติฐานในย่อหน้าข้างบน จึงได้ทำการทดลองโดยเพิ่มปริมาตรเบนซีนที่ใส่เข้าไปในระบบเป็น 3.9 ml และ 7.8 ml โดยยังคงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไว้ที่  $70^{\circ}C$  จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 จะเห็นว่า  $\%H_2O_2$  ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แม้ว่าเพิ่มปริมาตรเบนซีนในระบบถึง 10 เท่า

ตารางที่ 3 ผลของปริมาณเบนซีนที่มีต่อ  $\%H_2O_2$  ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอล (ตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1(b2) ปริมาตรน้ำ 90 ml อุณหภูมิ  $70^{\circ}C$ )

ปริมาตรเบนซีน (ml)	$\%H_2O_2$ ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอล
0.78	18.68
3.9	19.28
7.8	19.99

ข้อมูลในรูปที่ 5 ยังแสดงให้เห็นด้วยว่าเบนซีนต้องใช้เวลาในการละลายเข้าไปในเฟสน้ำจนอิ่มตัว ที่อุณหภูมิห้องจะใช้เวลาประมาณ 180 นาทีและคาดว่าที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะใช้เวลาที่น้อยลง ด้วยเหตุผลนี้งานวิจัยนี้จึงต้องทำการเติมเบนซีนเข้าไปในระบบและทำการปั่นกวนอย่างน้อย 1 ชั่วโมงก่อนที่จะทำการฉีด  $H_2O_2$  เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งนี้ก็เพื่อให้เฟสน้ำอิ่มตัวไปด้วยเบนซีนก่อนที่จะทำการฉีด  $H_2O_2$

### 3.4 การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เบนซีนในสถานะของเหลวที่เติมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์จะกระจายออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่ยังคงอยู่ในสถานะของเหลว (ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถแพร่เข้าไปในเฟสน้ำได้) และส่วนที่ต้องระเหยกลายเป็นไอเพื่อให้ความดันในระบบสูงถึงค่าความดันสมมูล ณ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเดียวกันนั้น ปริมาณเบนซีนในสถานะของเหลวที่ต้องระเหยกลายเป็นไอเพื่อให้ความดันในระบบสูงถึงค่าความดันสมมูล ณ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาจะแปรผันตามปริมาตรที่วางที่อยู่นือผิวของเหลว ถ้าหากที่วางที่อยู่นือผิวของเหลวมีปริมาตรมาก ปริมาณเบนซีนที่ต้องระเหยเพื่อให้ความดันสูงถึงค่าความดันสมมูลก็จะมากตามไปด้วย ซึ่งอาจทำให้เบนซีนที่ยังคงอยู่ในสถานะของเหลวนั้นมีปริมาณไม่มากพอที่จะปกคลุมพื้นผิวบนสุดของเฟสน้ำเอาไว้ได้ทั้งหมดในระหว่างการปั่นกวน ดังนั้นเพื่อลดปริมาณเบนซีนที่ต้องระเหยกลายเป็นไอ การทดลองที่อุณหภูมิสูงจึงได้เพิ่มปริมาตรน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางให้มีปริมาตรมากที่สุดเท่าที่เครื่องปฏิกรณ์จะรับได้คือ 120 ml ซึ่งการเพิ่มปริมาตรน้ำดังกล่าวไม่เพียงแต่จะลดปริมาตรช่องว่างเหนือผิวของเหลวซึ่งส่งผลให้ปริมาณเบนซีนที่ต้องระเหยกลายเป็นไอลดลงไปด้วย แต่ยังคงช่วยเพิ่มปริมาณเบนซีนที่ละลายอยู่ในเฟสน้ำให้สูงขึ้นตามไปด้วย (หมายเหตุ : ปริมาตรน้ำ 120 ml ได้มาจากการพิจารณาปริมาตรภายในทั้งหมดของเครื่องปฏิกรณ์ หักออกด้วย ปริมาตรเบนซีนที่จะเติมเข้าไปในระบบ ปริมาตรของแท่งแม่เหล็กที่ใช้กวน และที่วางที่ต้องเว้นไว้เพื่อให้ของเหลวขยายตัวที่อุณหภูมิสูง)



การทดลองในส่วนนี้ใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (เข้มข้น 30wt%) 1 ml ซึ่งเทียบเท่ากับ 0.01 mol และเบนซีน 7.8 ml ซึ่งเทียบเท่ากับ 0.1 mol ดังนั้นสัดส่วนโดยโมลของเบนซีนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจึงมีค่าเป็น 10 เท่าของโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ TS-1(b2) ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ผลของอุณหภูมิที่มีต่อทำปฏิกิริยา (ตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1(b2) ปริมาตรน้ำ 120 ml เบนซีน 7.8 ml)

อุณหภูมิ (°C)	%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอล
70	18.68
90	28.36
100	32.95
110	35.49

เมื่อเทียบกับผลการทดลองที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้ในตารางที่ 2 (ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1(b1)) จะเห็นว่าด้วยการปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพียงสองพารามิเตอร์คือเพิ่มปริมาตรน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางให้สูงขึ้น และเพิ่มปริมาตรเบนซีนที่ใช้ให้สูงขึ้น ทำให้สามารถเพิ่ม %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอลให้สูงมากขึ้นได้

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการทดลองการไฮดรอกซิเลชันเบนซีนไปเป็นฟินอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TS-1 ในระบบปั่นกววนแบบ 3 เฟส และนำเสนอแนวทางเพิ่ม %H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนไปเป็นฟินอลให้สูงขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิที่ยังไม่เคยมีผู้ใดทำมาก่อน คือใช้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของเบนซีนที่ความดันบรรยากาศ แต่เป้าหมายดังกล่าวจะบรรลุได้ก็ต่อเมื่อ (ก) ผสมเบนซีนเข้ากับน้ำและปั่นกววนจนกระทั่งเบนซีนละลายเข้าไปในเฟสน้ำจนอิมัลชัน (ข) ใช้ปริมาตรน้ำที่เป็นตัวกลางให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ เพราะเฉพาะเบนซีนที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำแล้วเท่านั้นที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ และ (ค) ใช้ปริมาณเบนซีนที่มากเพียงพอที่จะปกคลุมพื้นผิวหน้าของชั้นน้ำได้ทั้งหมดตลอดระยะเวลาที่ทำการปั่นกววนและทำการทดลอง เพื่อป้องกันไม่ให้เบนซีนที่ละลายเข้าไปในเฟสน้ำแล้วระเหยออกทางพื้นผิวสัมผัสระหว่างเฟสน้ำกับเฟสแก๊ส

#### เอกสารอ้างอิง

[1] Taramasso, M., Perego, G., and Notari, B., "Preparation of porous crystalline synthetic material comprised of silicon and titanium oxides", United States Patent, 4410501 (1983).  
 [2] Chammingkwan, P., Hoelderich, W. F., Mongkhonsi, T., and Kanchanawanichakul, P., "Hydroxylation of benzene over TS-PQTM catalyst. Applied Catalysis A: General 352: 1–9, 2009.  
 [3] Chammingkwan, P., "Selective oxidation of benzene over titanium-silica based catalyst", Doctor of Engineering thesis, Chulalongkorn University, 2008.

[4] Aurther, H., "The Mutual solubility of Liquids. I. The Mutual solubility of ether and water. II. The solubility of water in benzene.", Havemayer Chemical Laboratory, New York University, 1923.  
 [5] Sakullimcharoen, S., "Hydroxylation of alkyl benzene in a bubble reactor using TS-1 and modified TS-1 catalyst", Master of Engineering thesis, Chulalongkorn University, 2007.  
 [6] Kasemsiri, P., "Catalytic study of modified titanium silicalite-1 in the hydroxylation of alkyl benzene by hydrogen peroxide", Master of Engineering thesis, Chulalongkorn University, 2007.  
 [7] Mitpapan, S. and Mongkhonsi, T., "Hydroxylation of benzene to phenol at elevated temperature", The 17th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), November, 2010.  
 [8] Huang, D. G., Zhang, X., Chen, B. H., and Chao, Z. S., "Ethanol-assistant synthesis of TS-1 containing no extra-framework Ti species.", Catalysis Today 158: 510-514, 2010.

#### ประวัติผู้เขียนบทความ



รศ.ดร.ธรรธร มงคลศิริ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาโท Advanced Chemical Engineering และระดับปริญญาเอก Chemical Engineering จาก Imperial College of Science, Technology and Medicines, University of London ในปีพ.ศ. 2537 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย งานวิจัยในปัจจุบันเน้นทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มุ่งเน้นไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียจากแหล่งกำเนิดอยู่กับที่ โดยอาศัยปฏิกิริยาการออกซิไดซ์แบบเลือกเกิดของแอมโมเนีย