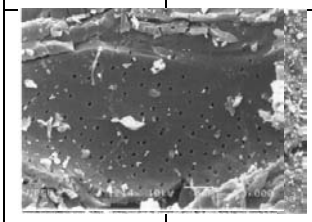
บทที่ 3

ผลการทดลองและบทวิจารณ์

3.1 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์

จากการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายเฟอร์ริกไนเตรต สามารถแสดงผลในตาราง 3-1

ตาราง 3-1 แสดงผลการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรต จำนวน 1 ครั้ง และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรตจำนวน 2 ครั้ง

ข้อมูล	ถ่านกัมมันต์	ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรต1 ครั้ง	ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรต 2 ครั้ง
% Fe	0.109	0.976	1.877
surface area (m^2/g)	980.900	873.750	862.710
			

จากตาราง 3-1 แสดงผลของการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายเฟอร์ริกไนเตรต พบว่า % Fe ที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ซึ่งวิเคราะห์ได้จากเครื่อง XRF (X-ray Fluorescence Spectrometer) มีค่าเท่ากับ 1.877 สำหรับการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยเฟอร์ริกไนเตรตจำนวน 2 ครั้ง และมีค่าเท่ากับ 0.976 สำหรับการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยเฟอร์ริกไนเตรตจำนวน 1 ครั้ง หรือ %Fe ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับจำนวนครั้งในการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยเฟอร์ริกไนเตรตดังกล่าว ส่วนผลของ surface area มีแนวโน้มลดลงหลังจากที่เพิ่มปริมาณการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยเฟอร์ริกไนเตรตมากขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันมากนัก

อย่างไรก็ตามสำหรับการทดลองในครั้งนี้ พบว่าเมื่อมีการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรต แล้วนำมาทำการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนในปริมาณหลายครั้งจะทำให้ประสิทธิภาพในการลดกำมะถันในน้ำมันดีเซลต่ำลง เนื่องจากการออกซิไดส์จะมีผลทำให้เฟอร์-ริกออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนถ่านกัมมันต์หลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งยิ่งทำการออกซิไดส์หลายครั้งเฟอร์ริกออกไซด์ก็มีโอกาสที่จะหลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์มากขึ้น ทำให้เฟอร์ริก-ออกไซด์เมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำและทำให้น้ำเกิดการแตกตัวเป็น hydroxy free radical ($OH^{\bullet}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงขึ้นลดลง

ทั้งนี้การที่เฟอร์ริกออกไซด์หลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ได้ง่าย อาจเนื่องจากการยึดเกาะระหว่าง Fe^{2+} บนผิวของถ่านกัมมันต์ไม่แข็งแรงเท่าที่ควร ส่วนหนึ่งอาจจะเกิดจากในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรตมีขั้นตอนการอบและเผาถ่านกัมมันต์หลายชั่วโมง จึงส่งผลทำให้โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นตัวช่วยยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกระเหยออกไป ทำให้การเคลือบเฟอร์ริกออกไซด์เกาะบนถ่านกัมมันต์ไม่แข็งแรงมากนักและหลุดได้ง่ายเมื่อมีแรงมากระทำหรือออกซิไดส์ดังกล่าว

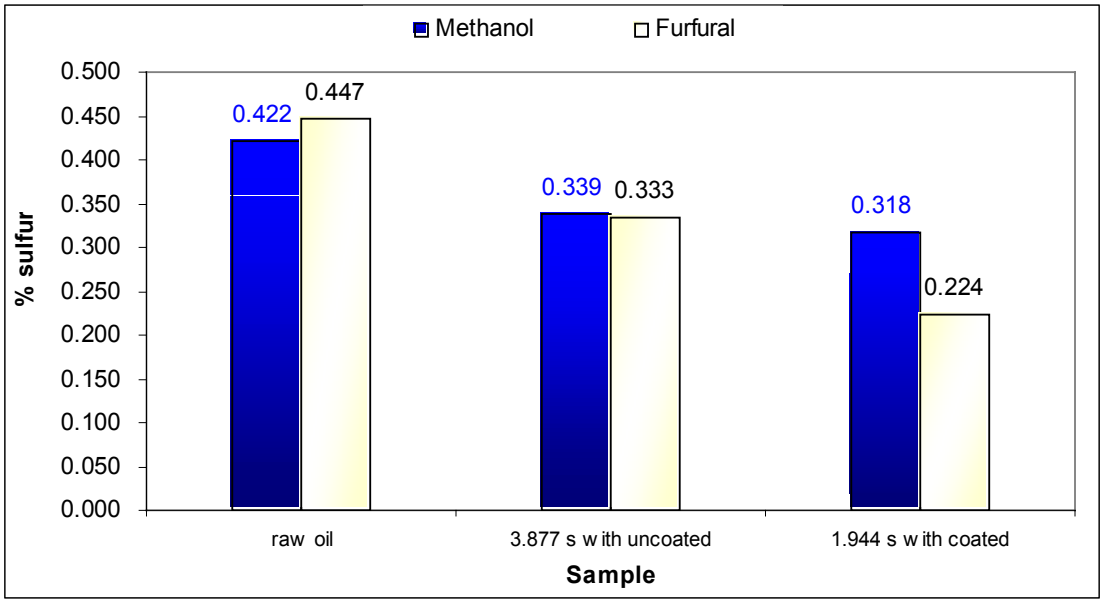
3.2 การเปรียบเทียบผลของตัวทำละลายในขั้นตอนการสกัด

การทดลองกระทำโดยนำน้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้นจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) และบริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์โดยมี retention time ของโอโซน 3.877 วินาที น้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยเฟอร์ริกไนเตรต จำนวน 2 ครั้ง โดยมี retention time 1.944 วินาที มาทำการผสมกับเมทานอลในสัดส่วนระหว่างน้ำมันดีเซลต่อเมทานอล เป็น 1: 3 และสัดส่วนระหว่างน้ำมันดีเซลต่อเฟอร์ฟูรอล เป็น 1: 1

3.2.1 ผลการศึกษาในขั้นตอนการสกัดน้ำมันดีเซล

ตาราง 3-2 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบผลของตัวทำละลายเมทานอลและเฟอร์ฟูรอลในการสกัดน้ำมันดีเซล จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)

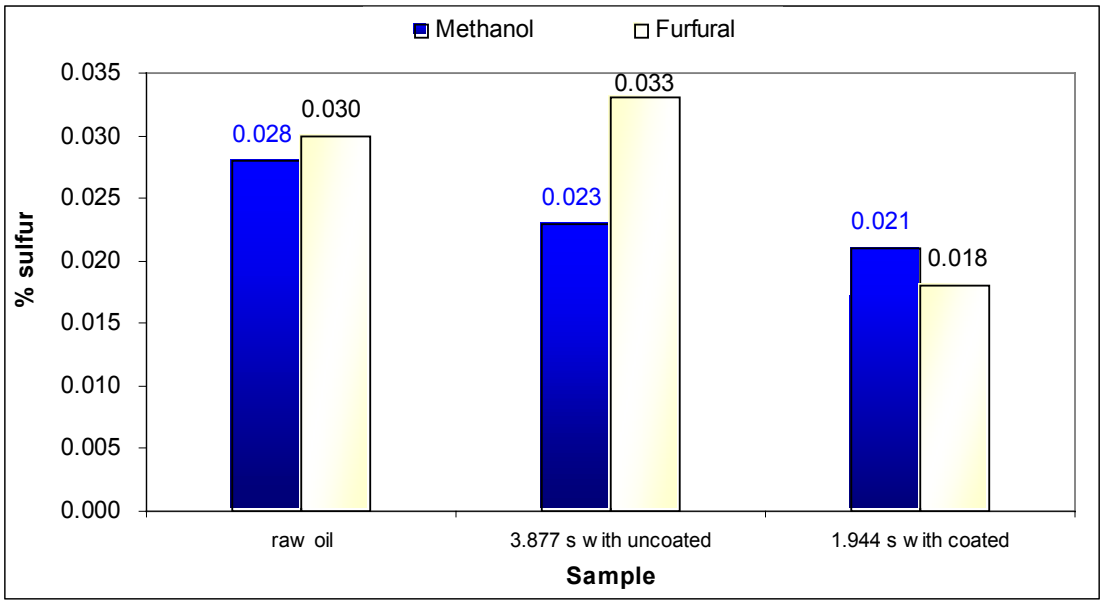
ลำดับที่	ตัวอย่างน้ำมันดีเซลที่นำมาสกัดด้วยตัวทำละลาย เมทานอล และเฟอร์ฟูรอล	%sulfur ในน้ำมันดีเซลหลังจากผ่านขั้นตอนการสกัด		หมายเหตุ
		เมทานอล	เฟอร์ฟูรอล	
1	น้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้น	0.422	0.447	สัดส่วนในการสกัดน้ำมันดีเซลต่อเมทานอลเป็น 1: 3 และ เฟอร์ฟูรอลเป็น 1: 1
2	น้ำมันดีเซลออกซิไดส์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 3.877 วินาที	0.339	0.333	
3	น้ำมันดีเซลออกซิไดส์ร่วมกับเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที	0.318	0.224	



ภาพประกอบ 3-1 กราฟแท่งแสดงผลของตัวทำละลายเมทานอลและเฟอร์ฟูรอลในการสกัดน้ำมันดีเซลจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)

ตาราง 3-3 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบผลของตัวทำละลายเมทานอลและเฟอร์ฟูรอลในการสกัดน้ำมันดีเซล จาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

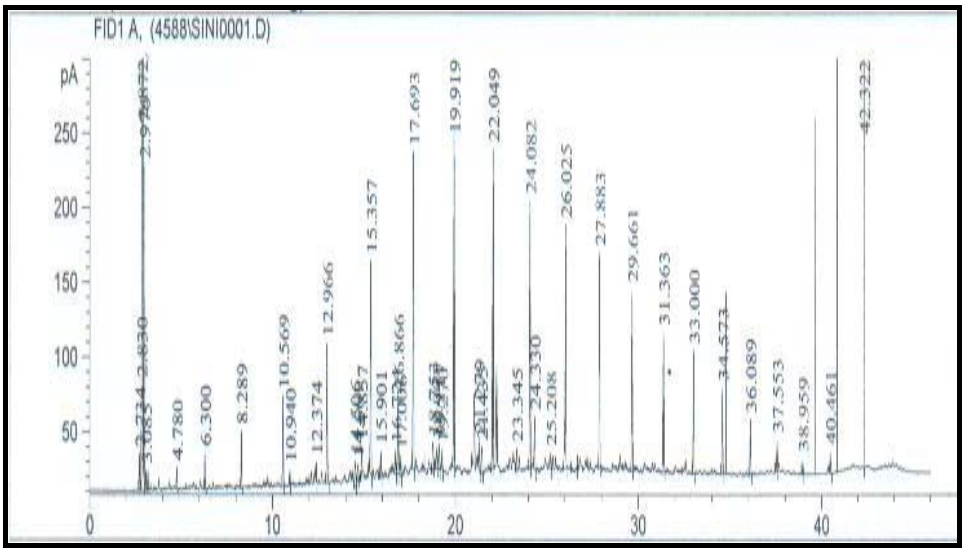
ลำดับที่	ตัวอย่างน้ำมันดีเซลที่นำมาสกัดด้วยตัวทำละลาย เมทานอล และเฟอร์ฟูรอล	%sulfur ในน้ำมันดีเซลหลังจากผ่านขั้นตอนการสกัด		หมายเหตุ
		เมทานอล	เฟอร์ฟูรอล	
1	น้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้น	0.028	0.030	สัดส่วนในการสกัดน้ำมันดีเซลต่อเมทานอล เป็น 1: 3 และ เฟอร์ฟูรอลเป็น 1: 1
2	น้ำมันดีเซลออกซิไดส์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 3.877 วินาที	0.023	0.033	
3	น้ำมันดีเซลออกซิไดส์ร่วมกับเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที	0.021	0.018	



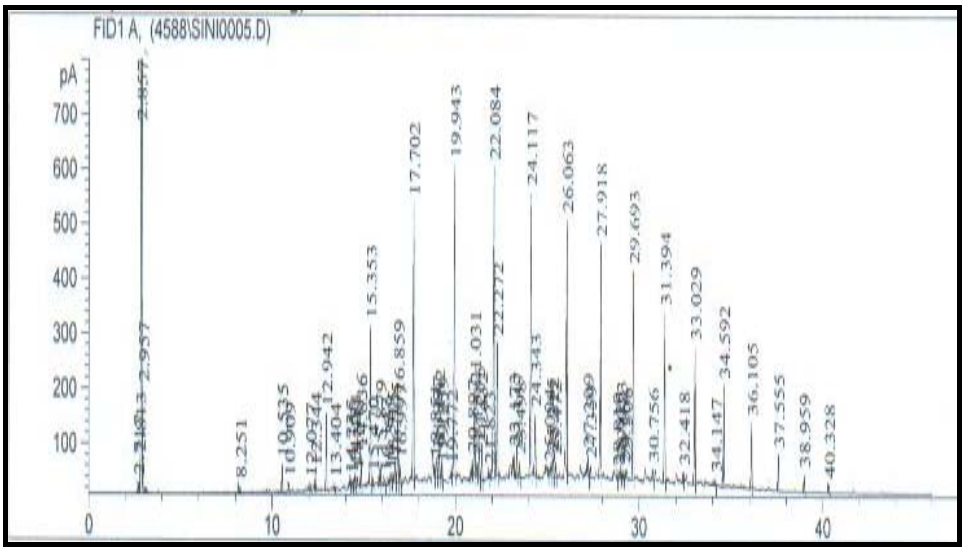
ภาพประกอบ 3-2 กราฟแท่งแสดงผลของตัวทำละลายเมทานอลและเฟอร์ฟูรอลในการสกัดน้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจาก จำกัด (มหาชน)

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบผลของตัวทำละลายในขั้นตอนการสกัดน้ำมันดีเซลโดยใช้ตัวทำละลายมีขั้วเมทานอลและเฟอร์ฟูรอล ผลการทดลองแสดงในตาราง 3-2 ถึง3-3 และเปรียบเทียบผลให้เห็นชัดขึ้นโดยการนำผลการทดลองมาแสดงเป็นกราฟแท่งในภาพประกอบ 3-1 ถึง 3-2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวทำละลายเมทานอลสามารถสกัดกำมะถันในน้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้นได้ดีกว่าตัวทำละลายเฟอร์ฟูรอล ทั้งนี้ในเบื้องต้นสันนิษฐานว่าอาจเนื่องจากสัดส่วนที่ใช้ในการสกัดของเมทานอลกับน้ำมันดีเซลมากกว่าเฟอร์ฟูรอลกับน้ำมันดีเซล ด้วยเพราะข้อจำกัดในด้านราคาของเฟอร์ฟูรอลที่เป็นเทคนิคอลเกรดซึ่งมีราคาค่อนข้างแพงมาก และแพงกว่าเมทานอลซึ่งเป็นคอมเมอร์-เชียลเกรด อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสกัดน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับถ่านกัม-มันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 3.877 วินาที ผลที่ได้แตกต่างกันระหว่างน้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) และ บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) โดยน้ำมันดีเซลจากบริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) จะให้ผลของ %sulfur เมื่อสกัดด้วยเฟอร์ฟูรอลสูงกว่าเมทานอล ในขณะที่น้ำมันดีเซล จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ให้ผล %sulfur เมื่อสกัดด้วยเฟอร์ฟูรอลต่ำกว่าเมทานอลเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดลองของการสกัดน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที ผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันระหว่างน้ำมันดีเซลจากทั้ง 2 บริษัท นั่นคือเมื่อใช้เฟอร์ฟูรอลในการสกัดน้ำมันดีเซลดังกล่าวจะมีผลทำให้ %sulfur ลดลงมากกว่าการใช้เมทานอลในการสกัด

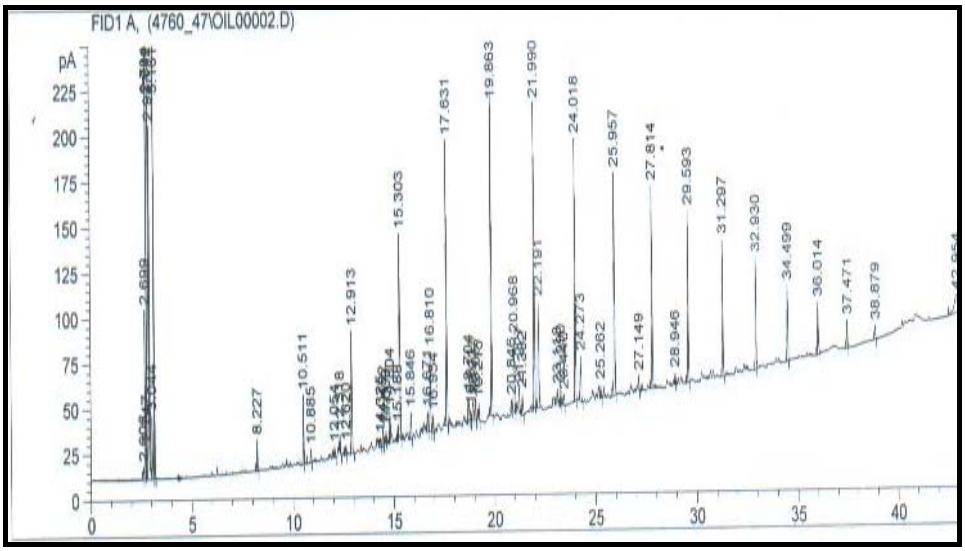
สำหรับการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) และ บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการลดสารกำมะถันได้ศึกษาโดยการวัดด้วย gas chromatography ในน้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้น น้ำมันดีเซลที่ผ่านการออก-ซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที และทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล น้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที และทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเฟอร์ฟูรอล ผลการทดลองพบว่าลักษณะของสเปกตรัม (peak) ของน้ำมันดีเซลมีลักษณะเดียวกันระหว่างน้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้นและน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาและสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลส่วนใหญ่ไม่ได้เปลี่ยนไปมากหลังผ่านกระบวนการลดสารกำมะถันแล้ว แต่อาจจะสังเกตว่าส่วนของไฮโดรคาร์บอนเบาบางส่วนจะหายไปบ้างหลังจากการออกซิเดชัน ซึ่งก็เป็นเหตุเนื่องจากการระเหยของไฮโดรคาร์บอนระหว่างการออกซิไดส์นั่นเอง ลักษณะของสเปกตรัมของน้ำมันดีเซลแสดงในภาพประกอบ 3-3 ถึง 3-8



ภาพประกอบ **3-3 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของน้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้น จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)**

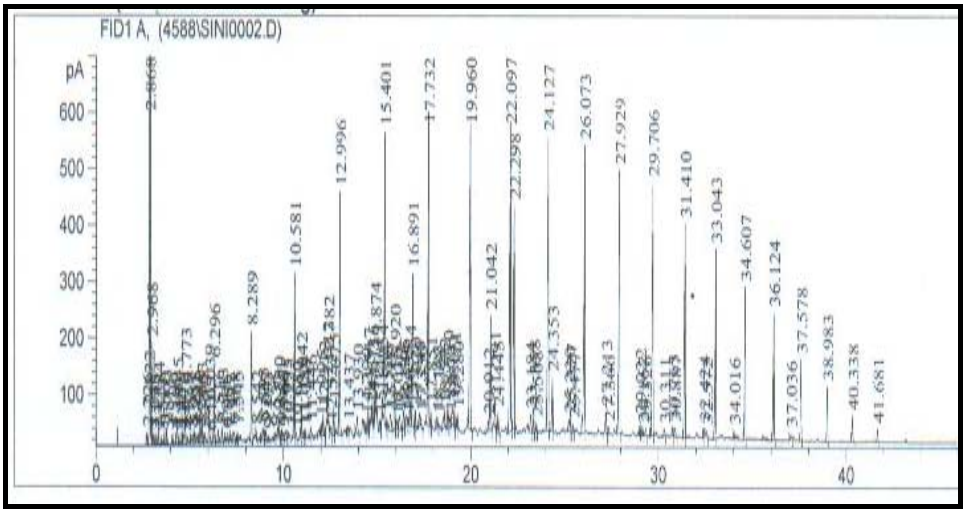


ภาพประกอบ **3-4** แสดงลักษณะของสเปกตรัมของน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที และทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล **จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)**



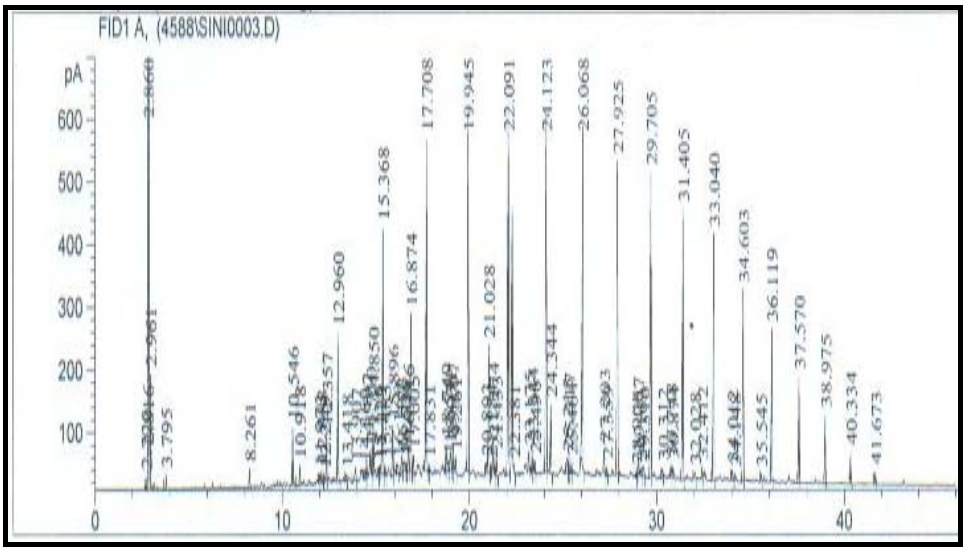
ภาพประกอบ **3-**5 แสดงลักษณะของสเปกตรัมน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที และทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเฟอร์ฟูรอล

จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)



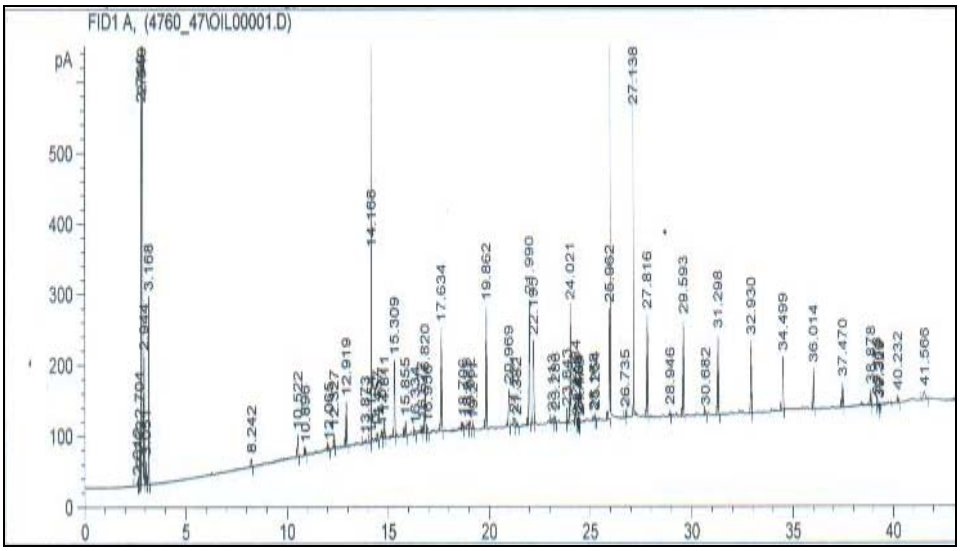
ภาพประกอบ 3-6 **แสดงลักษณะของสเปกตรัมของน้ำมันดีเซลวัตถุดิบเริ่มต้น**

จาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)



ภาพประกอบ **3-**7 แสดงลักษณะของสเปกตรัมน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที และทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล

จาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

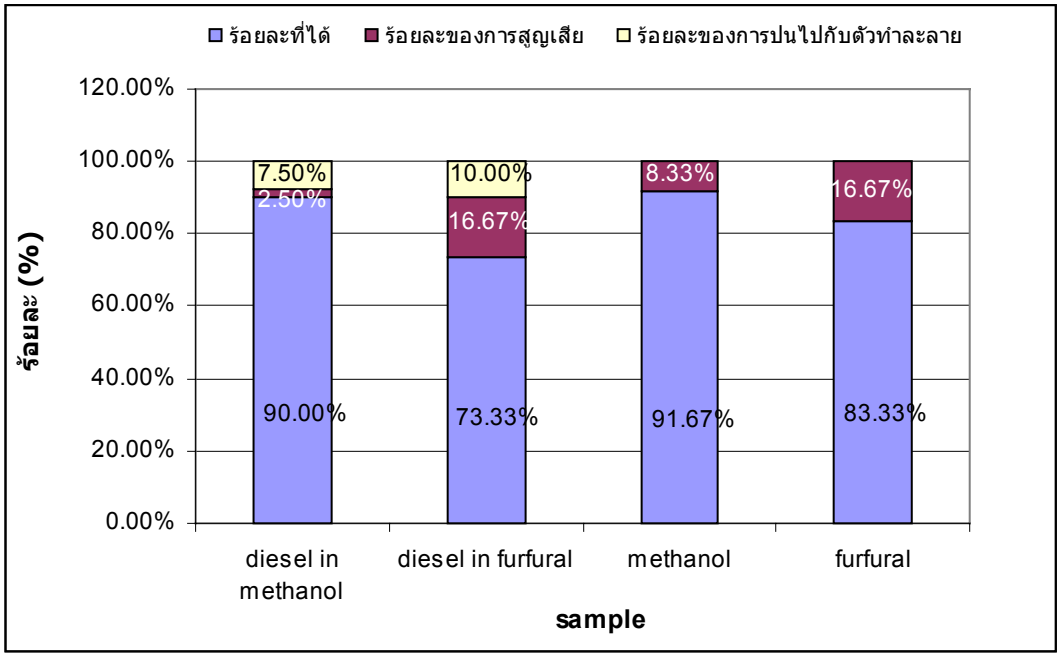


ภาพประกอบ **3-**8 แสดงลักษณะของสเปกตรัมน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยมี retention time ของโอโซน 1.944 วินาที และทำการสกัดด้วยตัวทำละลายเฟอร์ฟูรอล

จาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

3.2.2 ผลการศึกษาร้อยละผลได้ (yield) ของน้ำมันดีเซลหลังจากผ่านกระบวนการสกัด และร้อยละผลได้ (yield) ของการแยกคืนตัวทำละลาย

ในขั้นตอนนี้กระทำโดยการตรวจสอบการสูญเสียของน้ำมันดีเซลในกระบวนการขจัดกำมะถันโดยการตรวจวัดปริมาณในทุกขั้นตอนด้วยการวัดปริมาตรของน้ำมันดีเซลหลังจากผ่านกระบวนการสกัด และการนำเอาเฟสของตัวทำละลายไปกลั่นแยกตัวทำละลาย ซึ่งหลังจากการกลั่นแยกตัวทำละลายจะได้น้ำมันดีเซลเหลือค้างอยู่ในภาชนะกลั่น (residue oil) จากนั้นนำปริมาณที่ได้มาคำนวณหาร้อยละผลได้ (yield) ของน้ำมันดีเซล และร้อยละผลได้(yield) ของการแยกคืนตัวทำละลาย ผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 3-9



ภาพประกอบ **3-9** กราฟแท่งแสดงร้อยละผลได้ (yield) ของน้ำมันดีเซลหลังจากผ่านกระบวนการสกัด และร้อยละผลได้ (yield) ของการแยกคืนตัวทำละลาย

จากภาพประกอบ 3-9 พบว่าร้อยละผลได้ (yield) ของน้ำมันดีเซลหลังผ่านกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลได้ประมาณร้อยละ 90.00 ในขณะที่ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลหลังผ่านกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเฟอร์ฟูรอลประมาณร้อยละ 73.33 จะเห็นได้ว่าน้ำมันดีเซลที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยเมทานอลจะให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลมากกว่าตัวทำละลายเฟอร์ฟูรอล ทั้งนี้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลดังกล่าวให้ค่าใกล้เคียงกันระหว่างน้ำมันดีเซลจากทั้ง 2 บริษัท

ส่วนร้อยละผลได้ (yield) ของการแยกคืนตัวทำละลายหลังจากผ่านกระบวนการสกัดและนำมากลั่นด้วยเครื่อง ASTM D86 พบว่าตัวทำละลายเมทานอลสามารถแยกคืนได้ประมาณร้อยละ 91.67 และเฟอร์ฟูรอลประมาณร้อยละ 83.33 อย่างไรก็ตามในกระบวนการกลั่นแยกคืนตัวทำละลายจะพบน้ำมันดีเซลบางส่วนค้างอยู่ในภาชนะกลั่น (residue oil) ซึ่งเป็นน้ำมันดีเซลที่หายไปเนื่องจากการปนไปกับส่วนที่มีกำมะถันสูง น้ำมันดีเซลส่วนนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นอีก เช่น รวมกับน้ำมันเตาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

3.3 ผลการศึกษา retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซลในระบบดำเนินการเบดนิ่งแบบกึ่งกะ (semi-batch system)

การทดลองกระทำโดยการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนภายในคอลัมน์ออกซิเดชันแก้วรูปทรงกระบอก รวมถึงการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ระยะเวลาในดำเนินการ 3 ชั่วโมง และทำการศึกษา retention time ของโอโซนที่เวลาต่าง ๆ กัน จากนั้นนำน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์มาสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล

3.3.1 ผลศึกษาการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซน

น้ำมันดีเซลจากทั้ง 2 บริษัท เมื่อนำมาทำการออกซิไดส์ด้วยโอโซน แสดงผลการทดลองในตาราง 3-4

ตาราง 3-4 แสดงผลการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซน

ลำดับที่	ตัวอย่าง	%sulfur	หมายเหตุ
1	น้ำมันดีเซลจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)	0.392	น้ำมันดีเซลหลังผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และสกัดด้วยเมทานอลในสัดส่วน 1: 3
2	น้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)	0.029	

ผลการทดลองในตาราง 3-4 พบว่าหลังจากผ่านการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลจากบริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ด้วยโอโซนจะทำให้ปริมาณกำมะถันเหลือประมาณร้อยละ 0.392 จากเริ่มต้นร้อยละ 0.511 ในทำนองเดียวกันน้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ปริมาณกำมะถันเหลือประมาณร้อยละ 0.029 จากเริ่มต้นร้อยละ 0.050

ผลการทดลองข้างต้นแสดงให้ว่ากระบวนการออกซิเดชันมีส่วนทำให้อะตอมกำมะถันในน้ำมันดีเซลมีสภาพความเป็นขั้ว (polar) เพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบกำมะถันที่มีสภาพความเป็นขั้วเพิ่มขึ้นจะสามารถแยกออกจากน้ำมันได้ง่ายขึ้นโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายมีขั้ว

3.3.2 ผลการศึกษาการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์

น้ำมันดีเซลจากทั้ง 2 บริษัท เมื่อนำมาทำการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ภายในคอลัมน์ออกซิเดชันแก้วรูปทรงกระบอก โดยทำการศึกษาที่ retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซล เป็น 1.426 2.365 และ 3.877 วินาที ตามลำดับ สำหรับน้ำมันดีเซลจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)และ retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซล เป็น 3.877 วินาที สำหรับน้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ผลการทดลองแสดงในตาราง 3-5 ถึง 3-6

ตาราง 3-5 แสดงผลการออกซิไดส์น้ำมันดีเซล จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์

ลำดับที่	retention time ของโอโซน(วินาที)	%sulfur	หมายเหตุ
1	1.426	0.371	น้ำมันดีเซลหลังจากผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์ เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และสกัดด้วยเมทานอลในสัดส่วน 1: 3
2	2.365	0.358	
3	3.877	0.339	

ตาราง 3-6 แสดงผลการออกซิไดส์น้ำมันดีเซล จาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์

ลำดับที่	retention time ของโอโซน(วินาที)	%sulfur	หมายเหตุ
1	3.877	0.023	น้ำมันดีเซลหลังจากผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และสกัดด้วยเมทานอลในสัดส่วน 1: 3

ในการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซลจะมีผลทำให้ปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซลลดลง นอกจากนั้นหากทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ผลการทดลอง 3.3.1) จะเห็นได้ว่าการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ และสกัดด้วยตัวทำละลายจะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณกำมะถันที่ยังคงอยู่ในน้ำมันดีเซลได้มากกว่าการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว

จากประเด็นที่น่าสนใจของการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ที่ให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซลได้ดีกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว จึงได้มีการศึกษาการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติม ซึ่งแสดงในผลการทดลอง 3.3.3

3.3.3 ผลการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์

น้ำมันดีเซลจากทั้ง 2 บริษัท เมื่อนำมาทำการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ภายในคอลัมน์ออกซิเดชันแก้วรูปทรงกระบอก โดยทำการศึกษาที่ retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซล เป็น 1.944 3.089 3.370 และ 3.877 วินาที ผลการทดลองแสดงในตาราง 3-7 ถึง 3-8

ตาราง 3-7 แสดงผลการออกซิไดส์น้ำมันดีเซล จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์

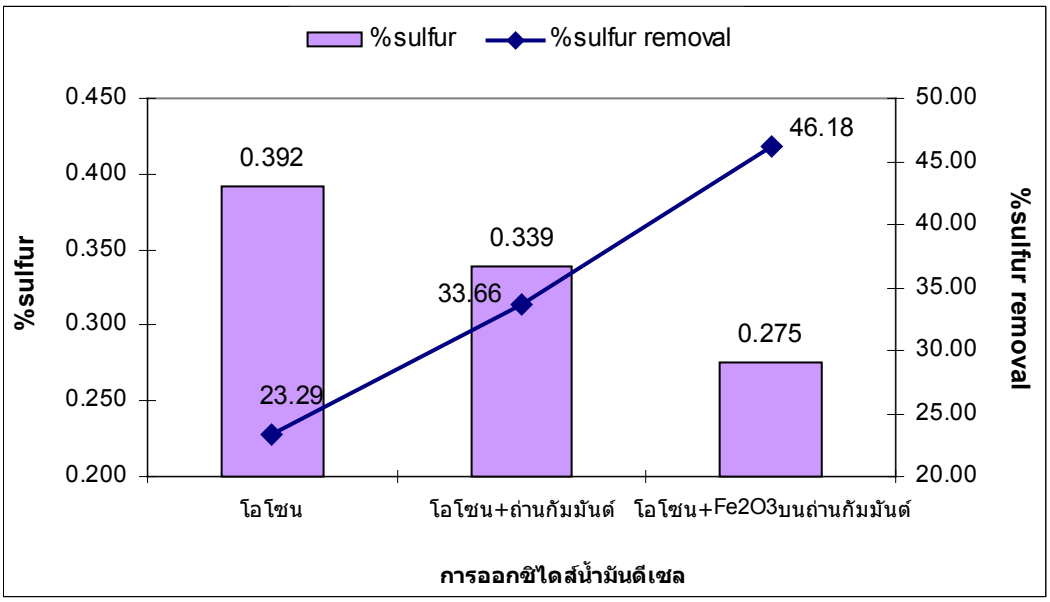
ลำดับที่	retention time ของโอโซน (วินาที)	%sulfur	หมายเหตุ
1	1.944	0.318	น้ำมันดีเซลหลังจากผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ ดำเนินการเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และสกัดด้วยเมทานอลในสัดส่วน 1: 3
2	3.089	0.312	
3	3.370	0.286	
4	3.877	0.275	

ตาราง 3-8 แสดงผลการออกซิไดส์น้ำมันดีเซล จาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์

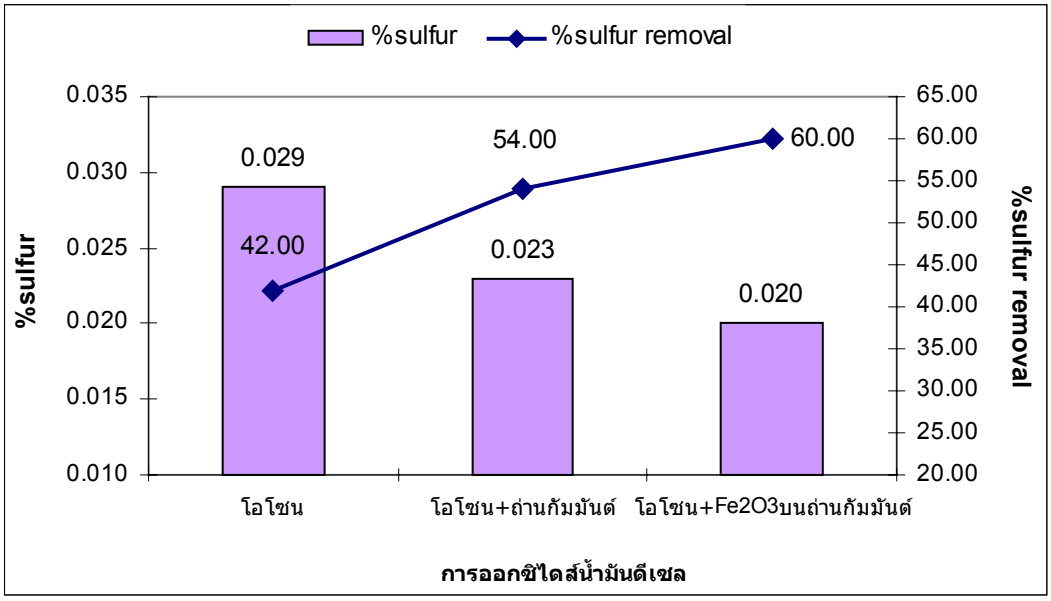
ลำดับที่	retention time ของโอโซน (วินาที)	%sulfur	หมายเหตุ
1	1.944	0.021	น้ำมันดีเซลหลังจากผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ ดำเนินการเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และสกัดด้วยเมทานอลในสัดส่วน 1: 3
2	3.089	0.021	
3	3.370	0.021	
4	3.877	0.020	

จากผลการทดลองในตาราง 3-7 และ ตาราง 3-8 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณกำมะถันที่คงอยู่ในน้ำมันดีเซลลดลงมากกว่าการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์

อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบผลการทดลองการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซน การออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ และการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ สามารถแสดงการเปรียบเทียบผลที่ชัดเจนขึ้น ดังในภาพประกอบ 3-10 ถึง 3-11



ภาพประกอบ **3**-10 แสดงกราฟแท่งเปรียบเทียบ %sulfur ในน้ำมันดีเซลจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) เมื่อทำการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลในสภาวะต่าง ๆ



ภาพประกอบ **3**-11 แสดงกราฟแท่งเปรียบเทียบ %sulfur ในน้ำมันดีเซล จาก บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) เมื่อทำการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลในสภาวะต่าง ๆ

หมายเหตุ: สำหรับผลการทดลองที่นำมาแสดงในกราฟแท่งในภาพประกอบ 3-10 ถึง 3-11 ข้อมูลผลการทดลองการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์จะใช้ข้อมูลที่ retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซลเท่ากัน คือ 3.877 วินาที

ผลการทดลองน้ำมันดีเซลจากทั้ง 2 บริษัท ให้ผลที่สอดคล้องกัน นั่นคือน้ำมันดีเซลหลังจากผ่านการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณกำมะถันที่ยังคงอยู่ในน้ำมันดีเซลได้ดีกว่าการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว หรือการออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่าเฟอร์ริกออกไซด์ออกไซด์เมื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้น้ำเกิดการแตกเป็น hydroxy free radical ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงขึ้น จึงมีส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการออกซิ-ไดส์เพิ่มสูงขึ้น ดังสมการ (สุเมธ ชวเดช, 2542)

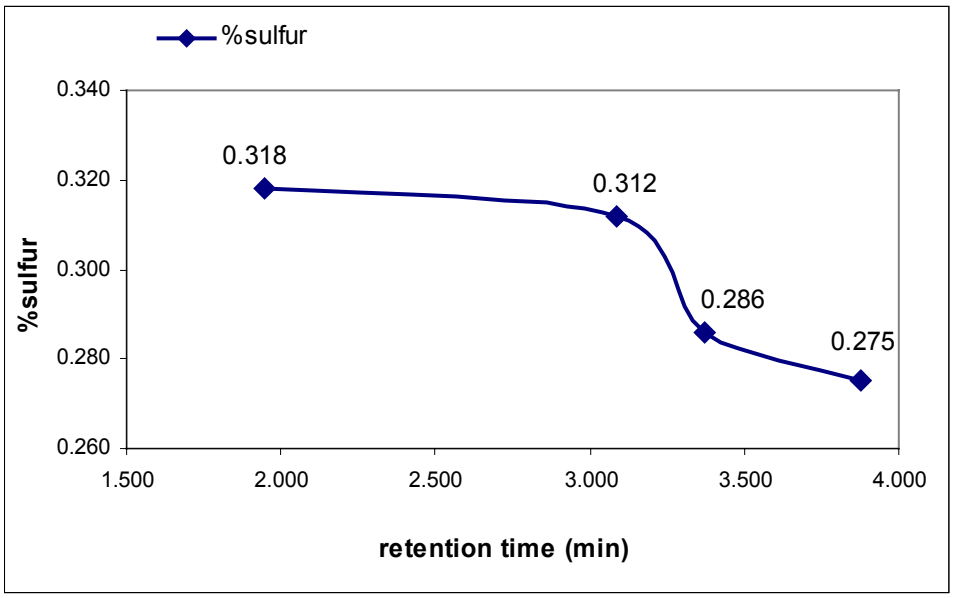
$$Fe^{3+} + H_2O \longrightarrow Fe^{2+} + H^+ + OH^{\bullet}$$

$$Fe^{2+} + O_3 \longrightarrow Fe^{3+} + O_3^-$$

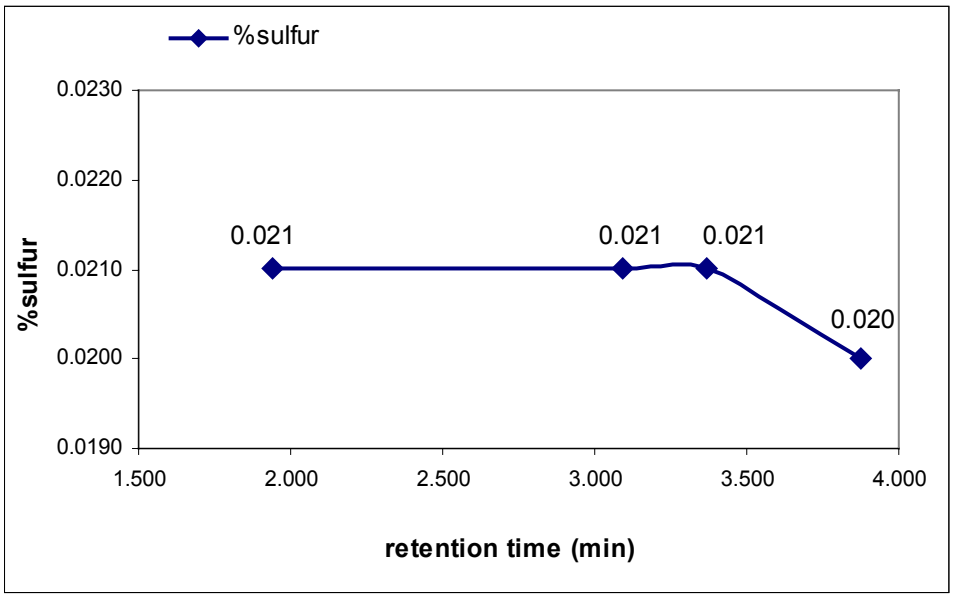
$$O_3^- \longrightarrow O^- + O_2$$

นอกจากนั้นในการพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของ retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซล ซึ่งในการทดลองครั้งนี้กระทำโดยการเพิ่มปริมาณความสูงของชั้นเบดภายในคอลัมน์ออกซิเดชันแก้ว และระยะเวลาดำเนินการ 3 ชั่วโมง เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสของโอโซนกับน้ำมันดีเซลมากขึ้นประสิทธิภาพในการขจัดกำมะถันก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังในตาราง 3-7 และ 3-8 อย่างไรก็ตามผลการทดลองในน้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) อาจจะเห็นผลการทดลองที่ไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซลเริ่มต้นมีปริมาณเพียงร้อยละ 0.050 ซึ่งเป็นปริมาณน้อยและผ่านตามเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด นอกจากนั้นโครงสร้างของสารประกอบกำมะถันอาจจะเป็นโครงสร้างที่ออกซิไดส์ยากทำให้ผลการทดลองแสดงให้เห็นไม่ชัดเจนนัก แต่ก็มีแนวโน้มที่เป็นไปได้

ประสิทธิภาพของการเพิ่มขึ้นของ retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซลในการออก-ซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์สามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนขึ้น โดยการนำมาแสดงผลในรูปของกราฟเส้น ดังในภาพประกอบ 3-12 ถึง 3-13



ภาพประกอบ **3**-12 แสดงกราฟเส้นในการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์ ที่ retention time ของโอโซนต่าง ๆ



ภาพประกอบ **3**-13 แสดงกราฟเส้นในการออกซิไดส์น้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์ ที่ retention time ของโอโซนต่าง ๆ

สำหรับการทดลองในครั้งนี้ยังได้มีการศึกษาผลของ retention time ของน้ำมันดีเซลกับโอโซนในระบบดำเนินการแบบต่อเนื่อง ซึ่งแสดงในผลการทดลอง 3.4

3.4 ผลการศึกษา retention time ของน้ำมันดีเซลกับโอโซนในระบบดำเนินการเบดนิ่งแบบต่อเนื่อง (continuous system)

การทดลองกระทำโดยการลดอัตราการป้อนเข้าของน้ำมันดีเซล (Q) เพื่อเป็นการเพิ่ม retention time ของน้ำมันดีเซลกับโอโซน ซึ่งกำหนดให้อัตราการป้อนเข้าของน้ำมันดีเซลทางตอนบนของคอลัมน์ออกซิเดชัน ดังนี้ 15 7.5 5 และ 3 ml/min หรือ retention time ของน้ำมันดีเซล เท่ากับ 20 40 60 และ 100 นาที ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการออกซิเดชันกระทำโดยการออกซิ-ไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ที่มีความสูงของชั้นเบด เท่ากับ 22.60 cm และควบคุมอัตราการไหลของโอโซน เท่ากับ 1,000 l/hr หลังจากนั้นนำน้ำมันดีเซลที่ผ่านการออกซิไดส์มาสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ในสัดส่วนน้ำมันดีเซลต่อเมทา-นอล เป็น 1: 3 ผลการทดลองแสดงในตาราง 3-9 ถึง 3-10

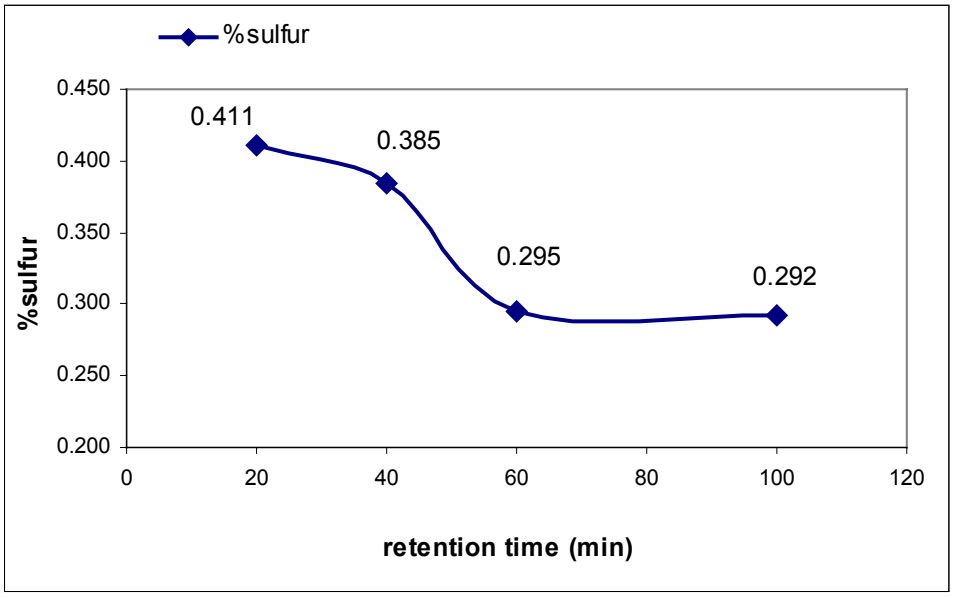
ตาราง 3-9 แสดงผลของ retention time ของน้ำมันดีเซล จาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)กับโอโซน (ออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์)

retention time (min)	% sulfur		
	เวลาในการเก็บตัวอย่าง		
	1 ช.ม.	2 ช.ม.	3 ช.ม.
20	0.417	0.410	0.411
40	0.399	0.391	0.385
60	0.382	0.354	0.295
100	-	0.328	0.292

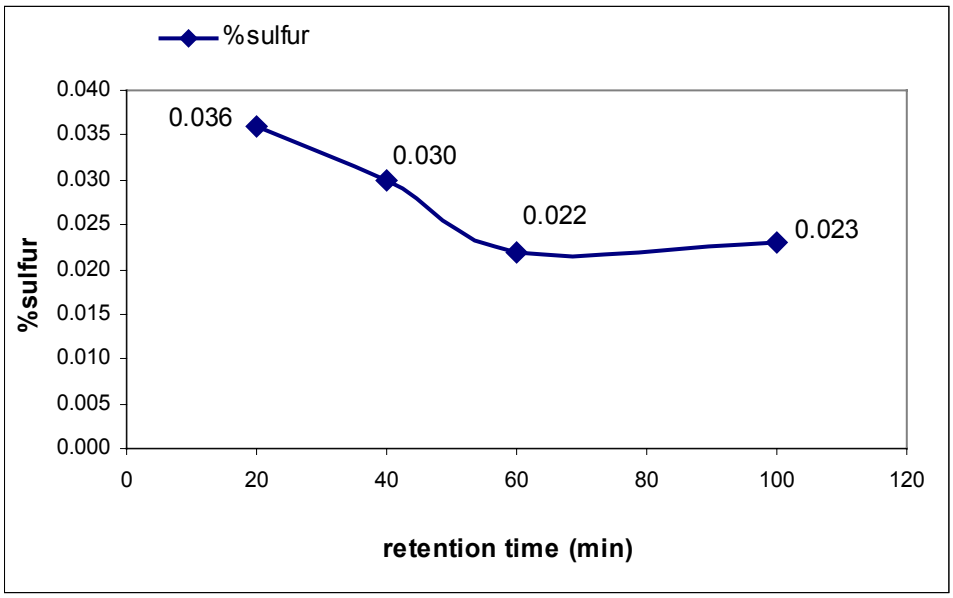
ตาราง 3-10 แสดงผลของ retention time ของน้ำมันดีเซล จาก บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) กับโอโซน (ออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์)

retention time (นาที)	% sulfur		
	เวลาในการเก็บตัวอย่าง		
	1 ช.ม.	2 ช.ม.	3 ช.ม.
20	0.037	0.038	0.036
40	0.039	0.032	0.030
60	0.033	0.027	0.022
100	-	0.024	0.023

เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาดำเนินการ 3 ชั่วโมง มาแสดงเป็นกราฟเส้นเพื่อให้เห็นแนวโน้มของประสิทธิภาพในการขจัดหรือลดปริมาณกำมะถันของการเพิ่มขึ้นของ retention time ของน้ำมันดีเซล แสดงในภาพประกอบ 3-14 ถึง 3-15



ภาพประกอบ **3**-14 แสดงกราฟเส้นในการเพิ่ม retention time ของน้ำมันดีเซลจาก บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) (ออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ และระยะเวลาดำเนินการ 3 ชั่วโมง)



ภาพประกอบ **3**-15 แสดงกราฟเส้นในการเพิ่ม retention time ของน้ำมันดีเซลจาก บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) (ออกซิไดส์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์-ริกออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ และระยะเวลาดำเนินการ 3 ชั่วโมง)

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อ retention time เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณกำมะถันที่คงอยู่ในน้ำมันดีเซลมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้การเพิ่ม retention time จะทำให้ระยะเวลาที่น้ำมันดีเซลสัมผัสกับโอโซนได้นานขึ้นนั่นเอง

สำหรับ retention time หรือระยะเวลาในการสัมผัสน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำมันดีเซลที่อยู่ในคอลัมน์หารด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำมันดีเซล (V/Q) ซึ่งในการดำเนินการที่สถานะคงตัว (steady state) อัตราการไหลเข้าและออกจากคอลัมน์ของน้ำมันดีเซลจะเท่ากัน ดังนั้นการเพิ่ม retention time จึงกระทำได้ 2 วิธี คือการเพิ่มปริมาตรในคอลัมน์ ซึ่งในกรณีที่คอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงตัวจะทำให้ระดับความสูงของน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้น และการลดอัตราการป้อน (Q) โดยการป้อนน้ำมันดีเซลเข้าคอลัมน์ในอัตราที่ต่ำลง สำหรับในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกวิธีการเพิ่ม retention time โดยการลดอัตราการป้อนของน้ำมันดีเซล (Q) ซึ่งสาเหตุที่ไม่เลือกการเพิ่มปริมาตรของคอลัมน์ เนื่องจากขีดจำกัดในด้านพื้นที่ของการทดลอง

เป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่ม retention time ทั้งสองวิธีการข้างต้นอาจจะมีผลกระทบต่อการดำเนินการคือในการลดอัตราการป้อน โดยไม่เปลี่ยนปริมาตรในคอลัมน์จะทำให้กำลังการผลิตต่ำลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาตรน้ำมันดีเซล (V) ให้สูงขึ้นอาจจะส่งผลกระทบให้คอลัมน์มีขนาดสูงขึ้นซึ่งต้องลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานที่ใช้ในการสูบของเหลวป้อนเข้าด้านบนคอลัมน์จะสูงขึ้นตามไปด้วย

3.5 การเปรียบเทียบผลของระบบดำเนินการแบบกึ่งกะและต่อเนื่อง

จากการทดลองออกซิไดส์น้ำมันดีเซลด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริก-ออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ โดยควบคุมความสูงของชั้นเบดที่ 22.60 cm อัตราการไหลของโอโซน 1,000 l/hr และสัดส่วนในการสกัดด้วยเมทานอล เป็น 1: 3 เมื่อนำผลการทดลองของ retention time ของโอโซน เท่ากับ 3.877 วินาที ในระบบดำเนินการแบบกึ่งกะ และ retention time ของน้ำมันดีเซล 100 นาที ในระบบดำเนินการแบบต่อเนื่อง โดยใช้ระยะเวลาดำเนินการเท่ากัน คือ 3 ชั่วโมง ผลการเปรียบเทียบแสดงในตาราง 3-11

ตาราง 3-11 แสดงผลการเปรียบเทียบของระบบดำเนินการแบบกึ่งกะและต่อเนื่อง

ลำดับที่	น้ำมันดีเซล	%sulfur	
		retention time ของโอโซน 3.877 วินาที (semi-batch system)	retention time ของน้ำมันดีเซล 100 นาที(continuous system)
1	บริษัทไทยออยล์ จำกัด มหาชน	0.275	0.292
2	บริษัทบางจาก ปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)	0.020	0.023

เมื่อพิจารณา retention time ของโอโซนกับน้ำมันดีเซลในระบบดำเนินการแบบกึ่งกะจะเห็นได้ว่าปริมาตรของน้ำมันดีเซลในการทดลองคงที่ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งในระยะเวลาดำเนินการนาน 3 ชั่วโมง จะได้สัดส่วนระหว่างโอโซนกับน้ำมันดีเซล เป็น 3.877 วินาที: 300 ml ในทำนองเดียวกันถ้าพิจารณา retention time ของน้ำมันดีเซลกับโอโซนในระบบดำเนินการแบบต่อเนื่องที่ retention time ของน้ำมันดีเซล 100 นาที หรืออัตราการป้อนเข้าของน้ำมันดีเซล เป็น 3 ml/min ซึ่งในระยะเวลาดำเนินการนาน 3 ชั่วโมง จะได้สัดส่วนโอโซนต่อน้ำมันดีเซล เป็น 3.877 วินาที: 540 ml นั่นแสดงให้เห็นว่าในระบบดำเนินการแบบต่อเนื่องจะทำให้ได้ปริมาตรน้ำมันดีเซลที่สัมผัสกับโอโซนมีมากกว่าในระบบดำเนินการแบบกึ่งกะ ทั้งนี้การที่ retention time ของโอโซนเท่ากันทั้งในระบบดำเนินการแบบกึ่งกะและต่อเนื่อง เนื่องจาก retention time ของโอโซนคำนวณมาจากระยะเวลาที่โอโซนสัมผัสกับน้ำมันดีเซล โดยพิจารณาจากความสูงของชั้นเบดในที่นี้เท่ากัน คือ 22.60 cm และอัตราการไหลของโอโซนเท่ากัน คือ 1,000 l/hr รวมถึงดำเนินปฏิกิริยาในคอลัมน์ออกซิเดชันแก้วเดียวกันซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.50 cm (รายละเอียดการคำนวณดูในภาคผนวก ง1.)

ดังนั้นผลการเปรียบเทียบระหว่างระบบดำเนินการแบบกึ่งกะและต่อเนื่องจะเห็นได้ว่าระบบดำเนินการแบบต่อเนื่องจะให้ปริมาณการผลิตที่มากกว่าระบบดำเนินการแบบกึ่งกะภายในระยะเวลาดำเนินการที่เท่ากัน