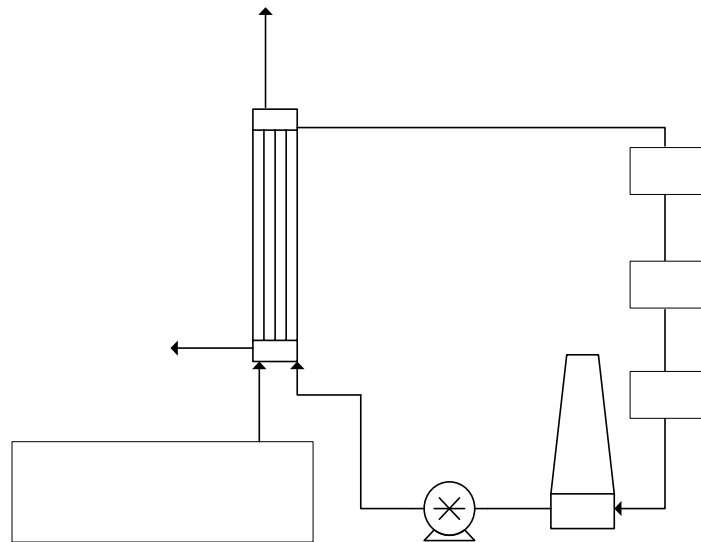




รูปที่ 3.3 ระบบเตาเผาผลิตน้ำส้มควันไม้

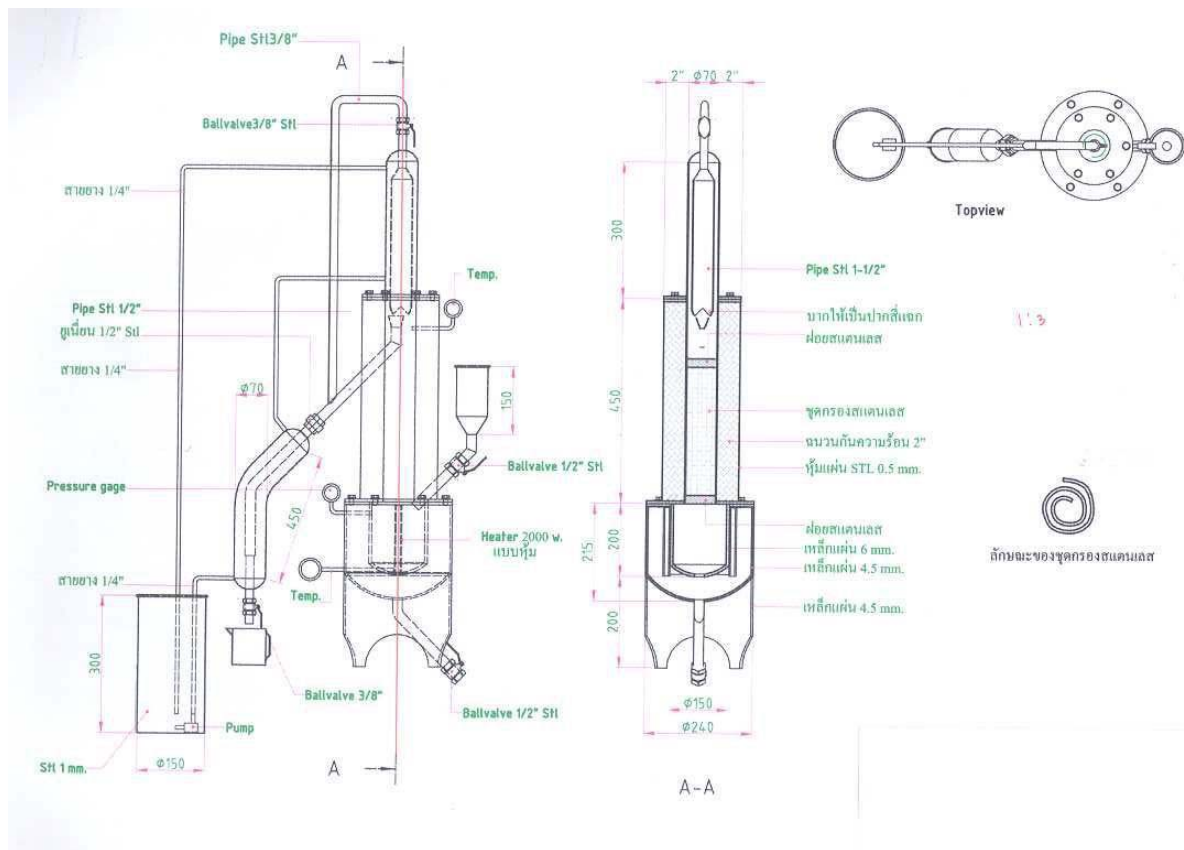
3.2.2 ชุดเครื่องกลั่น

การออกแบบชุดเครื่องกลั่นบรรยากาศที่ใช้ในงานวิจัย จำลองจากเครื่องกลั่นแยกแบบจุดเดือดแท้จริง (true boiling point distillation unit) ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยปรับขนาดชุดเครื่องกลั่นให้เล็กลงให้เหลือขนาดความจุ 3.5 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4-3.5 รายละเอียดของชุดเครื่องกลั่นมีดังนี้

1 หม้อกลั่น มีขนาดความจุ 3.5 ลิตร (ปริมาตรสารป้อนอยู่ระหว่าง 1–2 ลิตร อัตราส่วนรีฟลักซ์ 3:1 และทำการกลั่นที่ความดันบรรยากาศ) ที่ส่วนบนของหม้อกลั่นมีช่องเปิดแรกเพื่อติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของหม้อกลั่น ช่องเปิดสองใช้สำหรับถ่ายเทรณส่วนหนักที่ตกค้างจากการกลั่นออกเมื่อทำการกลั่นเสร็จสิ้นแล้ว ช่องที่สามใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน และช่องสุดท้ายใช้สำหรับป้อนน้ำส้มควันไม้เข้าสู่ระบบ

2 ตัวให้ความร้อน ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่หม้อกลั่นและถูกควบคุมโดยตัวควบคุม ซึ่งสามารถควบคุมอัตราความร้อนได้ถึง $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ควบคุมอัตราการกลั่นเพื่อเก็บแฟรคชันเบา

3 คอลัมน์การกลั่นทำจากวัสดุสแตนเลสจะเชื่อมต่อจากหม้อกลั่น โดยมีความสูงคอลัมน์กลั่น 45 ซม. บรรจุด้วยวัสดุแพค (packing) มีลักษณะเป็นแผ่นสแตนเลสตีบขึ้นเล็กๆ ม้วนเป็นขดกลมๆ สำหรับรอบๆ คอลัมน์หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน โดยมีตัววัดอุณหภูมิติดตั้งด้านบนที่ทางออกของผลผลิตการกลั่น



รูป 3.4 ลักษณะและขนาดเครื่องกลั่น



(ก)



(ข)



(ค)

รูป 3.5 ส่วนต่างๆ ของเครื่องกลั่นลำดับส่วน (ก) ส่วนด้านล่างจะเป็นตำแหน่งสารป้อน เกจอุณหภูมิและความดัน (ข) ส่วนด้านล่างเป็นชุดควบคุมอุณหภูมิและอุณหภูมิกลั่น (ค) ส่วนบน

4 เครื่องควบคุมแรงดันคอลัมน์ เครื่องควบคุมแรงดันติดตั้งอยู่ส่วนบนของคอลัมน์ ที่ผนังส่วนล่างภายในเครื่องควบคุมแรงดันจะมีร่อง (slot) ทั้งหมด 4 ร่อง โดยที่ 3 ใน 4 ร่องนี้จะเป็นทางให้น้ำสัมควันไม้ที่ผ่านการควบคุมแรงดันไหลกลับเข้าสู่คอลัมน์ ส่วนที่เหลือจะเป็นทางให้น้ำสัมควันไม้ควบคุมแรงดันไหลออกจากคอลัมน์

5 ท่อนำ (conduct tube) ส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากส่วนบนของคอลัมน์การกลั่นจะผ่านเข้าสู่ท่อนำ เพื่อที่จะเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยที่ท่อนำจะติดตั้งเครื่องควบคุมแรงดัน 1 ตัวเพื่อทำการควบคุมแรงดันสารเคมีที่ยังคงมีสถานะเป็นไอ เครื่องควบคุมแรงดันมีจะใช้น้ำหล่อเย็นจัด (น้ำเย็น)

3.2.3 ชุดกรองลดความดัน ถูกนำมาใช้เพื่อทำความสะอาดน้ำสัมควันไม้เบื้องต้น โดยใช้กระดาษกรองวอทแมน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดกรองลดความดัน

3.3 วิธีการวิจัย

การทดลองประกอบด้วย 2 ส่วน คือการเผาไม้เพื่อเก็บน้ำสัมควันไม้ และการกลั่นน้ำสัมควันไม้ดิบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การทดลองการเผาไม้เพื่อเก็บน้ำสัมควันไม้ดิบ วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยคือ ปีกไม้ยางพาราจากโรงเลื่อยในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา นำปีกไม้ยางพารามาตัดเป็นท่อนขนาดความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร

1. ปีกไม้ยางพาราจากโรงเลื่อยถูกนำผึ่งลมประมาณ 2 สัปดาห์ก่อนการเผา
2. ในการเผาแต่ละครั้ง ปีกไม้ยางพาราถูกนำไปตัดเป็นท่อนๆ ความยาวประมาณ 30 เซนติเมตรโดยเฉลี่ย และน้ำหนักของปีกไม้ที่นำเข้าสู่เตาประมาณ 15-20 กิโลกรัมต่อครั้ง
3. การเรียงไม้ในเตา ให้น้ำเตาบรรจุรองที่ก้นเตาเผาถ่าน จากนั้นทำการเรียงปีกไม้ยางพาราในเตาเผาถ่าน โดยเรียงปีกไม้ท่อนเล็กไว้ด้านล่างและท่อนใหญ่เรียงไว้ด้านบนเตาเผาถ่าน

4. จากนั้นทำการจุดไฟภายในเตาโดยควันที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้จะผ่านเครื่องควบแน่นที่ใช้น้ำหล่อเย็นจากหอลดอุณหภูมิ จะได้เป็นน้ำส้มควันไม้ดิบไหลลงสู่ภาชนะรองรับทางด้านล่าง สำหรับควันที่ไม่ควบแน่นจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ เมื่อควันที่ออกมาเริ่มจางใสให้ปิดช่องอากาศเข้าเพื่อยุติการเผาถ่าน หลังจากนั้นทิ้งเตาให้เย็นไว้ 1 คืนแล้วจึงนำถ่านออกจากเตาเผาถ่าน

5. ในการเก็บน้ำส้มควันไม้ดิบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

5.1 RW-1: ส่วนแรกเก็บตั้งแต่หยดแรกที่น้ำส้มควันไม้ควบแน่นจนกระทั่งอุณหภูมิในเตาเผาถ่าน 400°C (Int- 400°C)

5.2 RW-2: ส่วนที่สองเก็บตั้งแต่อุณหภูมิในเตาเผาถ่านมากกว่า 400°C จนกระทั่งควันที่ออกมาเริ่มจางใส (400°C up)

การเก็บน้ำส้มควันไม้จะอยู่ในภาชนะที่ปิดสนิทและไม่โดนแสงแดด และช่วงอัตราความร้อนรวมในเตาเป็น $0.6-2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ การทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับค่าผลการทดลองได้แสดงเป็นค่าเฉลี่ย

3.3.2 การทดลองการกลั่น การทดลองการแยกด้วยเครื่องกลั่น TBP มีดังนี้

1. ตวงน้ำส้มควันไม้ดิบ (RW-1 และ RW-2) ปริมาตร 1 ลิตร ใส่หม้อกลั่น
2. ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ในที่นี้ตั้งอุณหภูมิสุดท้ายเป็น 120°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิหรืออัตราการกลั่น $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$
3. เก็บตัวอย่างส่วนกลั่นในช่วงอุณหภูมิ (อุณหภูมิ ณ หม้อกลั่น) 3 ส่วน คือ
 - 3.1 DW-1: เป็นส่วนตั้งแต่หยดแรกจนถึงอุณหภูมิ 96°C
 - 3.2 DW-2: เป็นส่วนที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ $96-100^{\circ}\text{C}$
 - 3.3 DW-3: เป็นส่วนที่เหลือในหม้อกลั่น
4. เก็บตัวอย่างส่วนกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดฝาเกลียวหุ้มด้วยฟอยล์ให้มิดชิดแล้วนำเก็บในตู้เย็น สำหรับตัวอย่างสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงแฟรคชันกลั่นได้แก่

DW-1/RW-1 เป็นส่วนกลั่นส่วนแรกที่ได้จากการใช้สารป้อนเข้าเป็น RW-1

DW-3/RW-2 เป็นส่วนกลั่นส่วนที่สามที่ได้จากการใช้สารป้อนเข้าเป็น RW-2

3.3.3 การหาร้อยละความชื้นฐานเปียกของปึกไม้ยางพารา ประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

1. สุ่มเลือกตัวอย่างไม้ มาตัดให้มีความยาว 2 เซนติเมตร (การสุ่มเลือกไม้ 3 ชั้นจากชั้นบน กลาง และล่าง) แล้วชั่งน้ำหนักไม้
2. จากนั้นนำตัวอย่างไม้ไปอบที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (โดยประมาณ 3 วัน)
3. ชั่งน้ำหนักไม้ที่ได้หลังการอบ โดยร้อยละความชื้นฐานเปียกคำนวณได้จากสมการ (3.1) ดังนี้

$$\text{ร้อยละความชื้นฐานเปียก} = \left[\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

นอกจากนี้ร้อยละความชื้นสามารถแสดงบนฐานแห้งได้เช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดงบนฐานเปียกเป็นหลัก สำหรับการคำนวณบนฐานแห้งดังสมการ (3.2)

$$\text{ร้อยละความชื้นฐานแห้ง} = \left[\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง}} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

3.3.4 การหาช่วงอุณหภูมิเดือดของน้ำส้มควันไม้

การหาช่วงอุณหภูมิเดือดด้วยเครื่องกลั่นมาตรฐาน ASTM-D86 ดังรูปที่ 3.7 โดยใช้น้ำส้มควันไม้ 100 มิลลิลิตร ทำการให้ความร้อนแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่หยดของเหลวออกมาหยดแรก และบันทึกทุก 5 มิลลิลิตรที่ได้ของเหลว จนกระทั่งไม่มีของเหลวออกมาอีกแล้ว



รูปที่ 3.7 เครื่องมือวัดช่วงอุณหภูมิเดือด ASTM-D86

3.3.5 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะและค่าพีเอช

การวัดเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะใช้เครื่องพิกานอิมิเตอร์ (G-335 Picanometer Top and Jar) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และค่าพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ แบบ glass electrode (Mettler Toledo Inlab 412; Orion)

3.3.6 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography – Mass Spectrometry (GC-MS) และเครื่อง Gas Chromatography (GC)

เครื่อง GC-MS: รุ่น HP5890 GC-HP 5972 MSD และเครื่อง GC-FID (Flame Ionization Detector) คอลัมน์ J&W Scientific GC INNOWAX Column (Agilent Technologies Inc., P/N:

19091N-133E) ความหนาชั้นฟิล์ม 0.5 ไมครอน ความยาว 30 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง คอลัมน์ 0.32 มิลลิเมตร และช่วงอุณหภูมิต่อการวิเคราะห์ 40-260°C สภาวะการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้ อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C คงที่ไว้เป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิสุดท้าย 250°C คงที่ไว้ 30 นาที โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น 2°C/min

3.3.7 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารเคมี

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารเคมีมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 10% v/v ในสารมาตรฐานที่เป็นของแข็ง และ 10 w/v ในสารมาตรฐานที่เป็นของแข็ง โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย
2. ทำการวิเคราะห์สารมาตรฐานกับเครื่อง GC-FID
3. ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำส้มควันไม้ที่สภาวะที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ (เนื่องจากยังไม่ทราบข้อมูลปริมาณของสารต่าง ๆ ในตัวอย่างน้ำส้มควันไม้)
4. พิจารณาพีคสารมาตรฐานที่ออกมา ณ เวลานั้น ๆ ว่ามีขนาดพื้นที่ใต้พีคเท่าไรเปรียบเทียบกับพีคที่ออกมา ณ เวลาเดียวกันของตัวอย่างน้ำส้มควันไม้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
5. ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน 5-6 ระดับ ให้ครอบคลุมช่วงของความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำส้มควันไม้ที่ทำการวิเคราะห์ไปในเบื้องต้น
6. ทำการวิเคราะห์สารมาตรฐานกับเครื่อง GC-FID ที่สภาวะที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำ 2-3 ครั้ง
7. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคและความเข้มข้นของสารมาตรฐานต่าง ๆ
8. คำนวณหาความสัมพันธ์ของกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานต่าง ๆ ในรูปสมการเชิงเส้น พร้อมทั้งคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งตัวอย่างกราฟมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ข
9. ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำส้มควันไม้กับเครื่อง GC-FID โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำ 2-3 ครั้ง
10. ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นของสารมาตรฐานต่าง ๆ ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำส้มควันไม้ได้ สำหรับตัวอย่างของ retention time และพื้นที่ใต้กราฟ ณ สภาวะสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 10% v/v ในสารมาตรฐานที่เป็นของแข็ง และ 10 w/v ในสารมาตรฐานที่เป็นของแข็งดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างระยะเวลาที่พบและพื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐานด้วยเครื่อง GC-FID

Retention time (min)	Substance	Area of standard chemical*
2.087	Acetone	9,637.62
2.143	Formic acid	19,186.70
2.641	Methanol	3,031.42
21.988	3-Furaldehyde	3,811.48
22.359	Acetic acid	424.08
24.036	Furfural	3,352.40
26.193	2-Furylmethylketone	3,034.85
27.245	Propionic acid	1,158.48
32.420	Butyric acid	2,002.72
34.869	Furfuryl alcohol	2,788.68
38.171	Veratrole	3,262.72
44.779	Guaiacol	6,830.86
51.087	Phenol	5,544.55
54.940	p-Cresol	5,622.31
55.133	m-Cresol	7,600.25
63.112	2, 6-Dimethoxyphenol	1,268.87
64.716	Fluorene	2,380.46
78.877	Phenanthrene	2,175.42

*ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 v/v (ในสารมาตรฐานที่เป็นของแข็ง) และ 10 w/v (ในสารมาตรฐานที่เป็นของแข็ง)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ความชื้นวัตถุดิบ

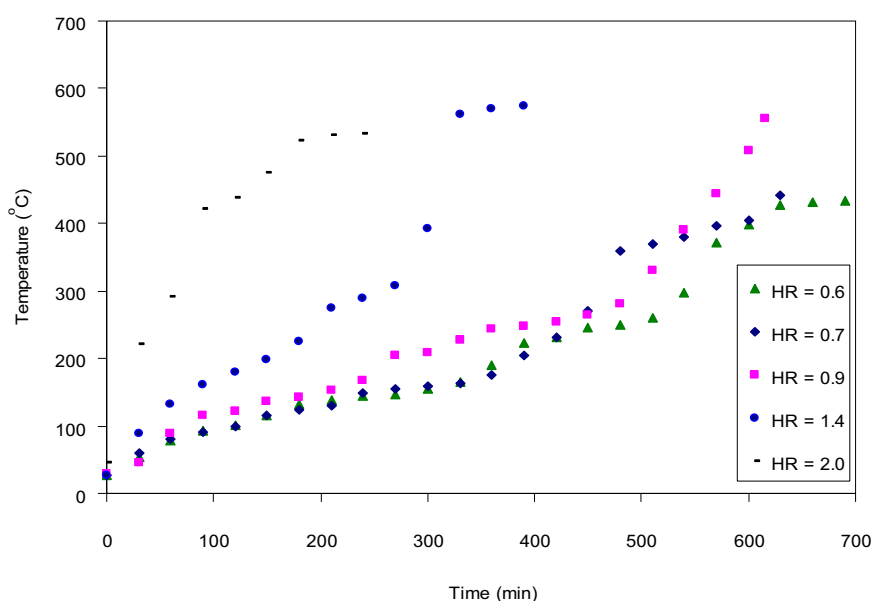
ไม้ยางพาราที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีความชื้นเฉลี่ยในอยู่ช่วง 14.1-14.5% (ฐานเปียก) หรือ 16.4-17.1% (บนฐานแห้ง) ตัวอย่างผลการวัดความชื้นแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักของน้ำในปีกไม้ยางพารา

Sample No.	% Moisture content (wet basis)	% Moisture content (dry basis)
1	14.5	17.0
2	14.1	16.4
3	14.5	17.1
4	14.1	16.4
5	14.1	16.4

4.2 การกระจายความร้อนภายในเตา

การควบคุมอุณหภูมิในเตากระทำดังนี้คือเมื่อจุดไฟหน้าเตาแล้ว อุณหภูมิภายในเตาเริ่มสูงขึ้นจนกระทั่งมีอุณหภูมิโดยประมาณ 150°C (จุดวัดอุณหภูมิอยู่ด้านหน้าเตา) จากนั้นทำการปิดฝาเตา และควบคุมอัตราการความร้อนโดยการควบคุมการเปิดปิดแฉกเปอร์ดของอากาศที่ช่องทางเข้า การวัดอุณหภูมิภายในเตาใช้เทอร์โมคัปเปิลที่ด้านหน้าบนและด้านหลังล่างเตา โดยอุณหภูมิเตาเป็นค่าเฉลี่ยของสองจุดดังกล่าว ตัวอย่างโปรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าโปรไฟล์ที่ค่าอัตราการความร้อน $0.6-1.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน นั่นคือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเตาจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยโปรไฟล์อุณหภูมิในช่วงแรกของการอุ่นเตาจะเพิ่มด้วยความชันน้อยกว่าในช่วงหลัง ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เพิ่มขึ้นถูกถ่ายโอนให้กับผนังเตาพร้อมๆ กับอุ่นไม้ภายในเตา ประกอบกับการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิ $200-280^{\circ}\text{C}$ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน จากนั้นความร้อนจากการเผาไหม้จึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยอัตราที่เร็วขึ้นสำหรับอัตราการร้อนที่ใช้ในการแสดงผลการทดลองเป็นอัตราการร้อนรวม โดยคำนวณจากผลต่างของอุณหภูมิที่สภาวะสุดท้ายก่อนปิดเตาเทียบกับที่สภาวะเริ่มต้นต่อช่วงเวลาของการเก็บน้ำส้มควันไม้ ดังนั้นอัตราการร้อนเฉพาะจุดที่เวลาใดเวลาหนึ่ง อาจมีค่าแตกต่างไปจากอัตราการร้อนรวม สำหรับอัตราการร้อนที่เพิ่มขึ้น จะใช้เวลาการเผาที่เร็วขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาถ่านที่อัตราการความร้อน (HR: °C/min) ต่างๆ เทียบกับเวลา

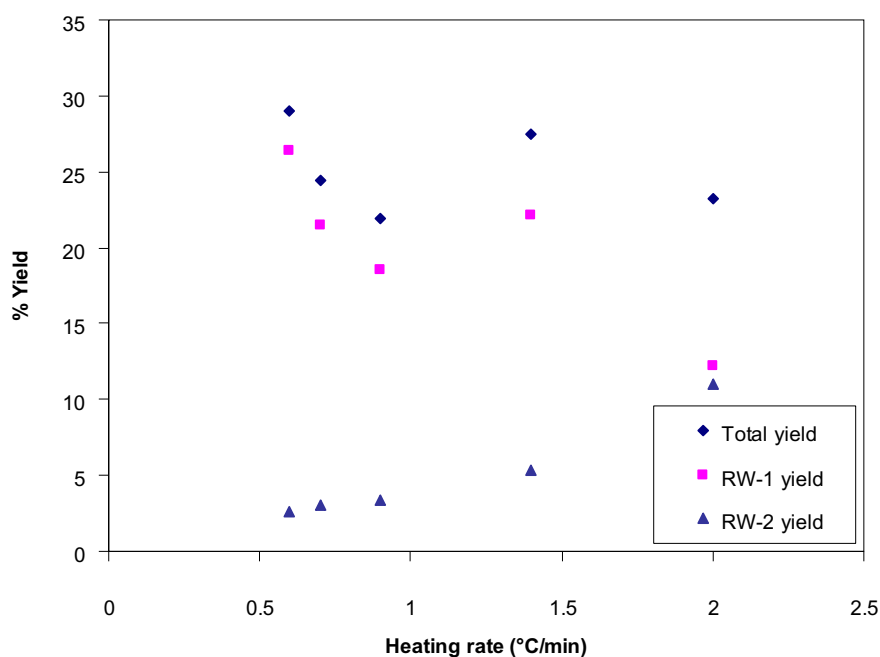
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำส้มควันไม้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาเผาประกอบด้วยถ่านและน้ำส้มควันไม้ แต่รายงานผลเฉพาะส่วนของน้ำส้มควันไม้เท่านั้น ทั้งนี้เพราะการทดลองสิ้นสุดโดยทำการปิดเตาเมื่อหยุดการเก็บน้ำส้มควันไม้ โดยใช้การสังเกตจากควันที่ได้จากเตามีลักษณะจางใส สำหรับการวิเคราะห์ยิลด์แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ยิลด์ของน้ำส้มควันไม้จากเตาเผา*

Heating rate (°C/min)	Time (minutes)	% Yield of overall wood vinegar	% Yield of fraction RW-1	%Yield of fraction RW-2
0.6	690	29.01	26.41	2.60
0.7	630	24.45	21.43	3.01
0.9	615	21.91	18.50	3.41
1.4	390	27.45	22.11	5.34
2.0	240	23.27	12.17	11.04

*ยิลด์เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เทียบกับน้ำหนักของไม้ที่ป้อนเข้า

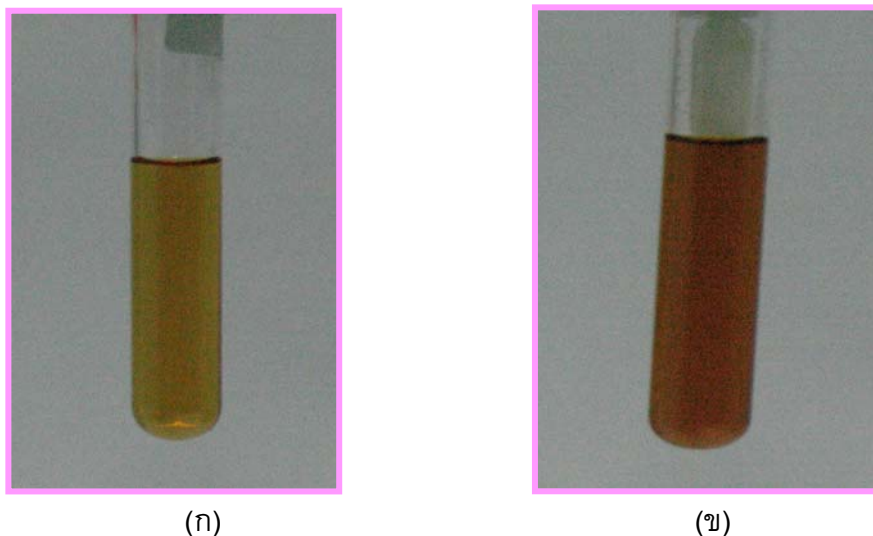


รูปที่ 4.2 ยิลด์รวมและยิลด์ของแฟรคชัน RW-1 และ RW-2 ณ อัตราความร้อนต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 4.2 พบว่ายิลด์น้ำส้มควันไม้ที่ได้มีค่าโดยเฉลี่ย 21.91-29.01% โดยอัตราความร้อนสูงมีแนวโน้มยังคงให้ค่ายิลด์สูง รวมทั้งใช้เวลาการเผาน้อยกว่าที่อัตราความร้อนต่ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณน้ำส้มควันไม้ของแฟรคชัน RW-1 (เก็บเมื่อหยุดแรกควบแน่นหรือช่วงอุณหภูมิการเก็บคืออุณหภูมิห้อง-400°C) มีค่าสูงกว่าแฟรคชัน RW-2 ทั้งนี้เป็นผลจากปริมาณความชื้นในไม้ที่ถูกไล่ออกด้วยความร้อนอย่างช้าๆ อย่างไรก็ตามปริมาณของแฟรคชัน RW-2 มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออัตราความร้อนสูงขึ้น อาจกล่าวได้ว่าหากพิจารณาเฉพาะกระบวนการผลิตน้ำส้มควันไม้แล้ว การผลิตด้วยอัตราความร้อนสูงให้ผลยิลด์ที่ดีและใช้เวลาน้อยกว่า เช่น ที่อัตราความร้อน 0.6°C/min พบว่ายิลด์รวมมีค่าสูงสุดและใช้เวลาการเผา 690 นาที จึงอาจไม่เหมาะสมหากต้องการผลิตน้ำส้มควันไม้เป็นหลัก อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตน้ำส้มควันไม้ส่วนใหญ่มักได้จากการบวนการผลิตถ่านเป็นหลัก (น้ำส้มควันไม้เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้) ดังนั้นการผลิตส่วนใหญ่จึงมักทำที่อัตราความร้อนต่ำ

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าสภาวะการผลิตน้ำส้มควันไม้ที่เหมาะสมเป็นอัตราความร้อน 1.4 °C /min ซึ่งมีแนวโน้มค่ายิลด์สูงและเวลาการผลิตที่ลดลงมาก อย่างไรก็ตามอัตราความร้อนที่ทดลองในงานวิจัยนี้ยังคงอยู่ในช่วงแคบ โดยบางจุดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ผลการทดลองจึงอาจไม่แสดงอิทธิพลของอัตราความร้อนอย่างเด่นชัด สำหรับข้อแนะนำการเพิ่มยิลด์น้ำส้มควันไม้ นั้นควรใช้อัตราความร้อนสูง ลดอุณหภูมิของแก๊สให้เร็ว และควบคุมอุณหภูมิการเผาให้ต่ำ (Bridgewater and Bridge, 1991; Dimirbas, 2001; Kucuk and Demirbas, 1996) สำหรับลักษณะสีของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน RW-1 มีลักษณะสีน้ำตาลปนแดง ในขณะที่แฟรคชัน RW-

2 มีสีน้ำตาลปนแดงเข้มถึงดำดังรูปที่ 4.3 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงส่งผลทำให้เกิดน้ำมันดินปนเปื้อนออกมามากกว่าช่วงการเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 4.3 สีของน้ำส้มควันไม้ดิบ (ก) แพรคชัน RW-1 (ข) แพรคชัน RW-2

ค่าพีเอชและค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันดิบของส่วน RW-1 และ RW-2 แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าแฟรคชัน RW-1 มีแนวโน้มความเป็นกรดมากกว่าแฟรคชัน RW-2 ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณกรดต่างๆ จากการกลั่นสลายไม้ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิ 200-300 °C โดยมีรายงานผลการทดลองค่าพีเอชของน้ำส้มควันไม้จากไม้ยางพาราอยู่ในช่วง 2.98 (Lim, 2002) และ 1.97-3.49 (Fukuda *et al.*, 1991) ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในส่วนของ RW-1 และ RW-2 มีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีการรายงานไว้ สำหรับแนวโน้มพีเอชของแฟรคชัน RW-2 มีค่าสูงกว่าในแฟรคชัน RW-1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาการสลายไม้ที่อุณหภูมิสูงเกิดเป็นสารประกอบในกลุ่มฟีนอลหรือกลุ่มอื่นๆ มากกว่าการเกิดกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก จึงพบความเป็นกรดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าพีเอช ณ อัตราความร้อนต่างๆ พบว่าอัตราความร้อนไม่มีนัยสำคัญต่อค่าพีเอชที่ได้ในแต่ละแฟรคชัน

ความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 1.010-1.027 โดยมีรายงานผลการทดลองค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้จากไม้ยางพาราอยู่ในช่วง 1.014 (Lim, 2002) และ 1-1.050 (Fukuda *et al.*, 1991) สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าไม่ปรากฏอิทธิพลของอัตราความร้อนต่อค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละแฟรคชันเช่นกัน

ตาราง 4.4 แสดงค่าพีเอชของน้ำส้มควันกลั่นส่วน DW-1, DW-2 และ DW-3 และแสดงผลรวมกับน้ำส้มควันไม้ดิบในรูปที่ 4.4 พบว่าแฟรคชัน DW-2 มีแนวโน้มความเป็นกรดมากกว่าแฟรคชัน DW-1 และ DW-3 ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณกรดต่างๆ มีจุดเดือดอยู่ในช่วง

อุณหภูมิ 100-140°C นอกจากนี้หากเปรียบเทียบความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการกลั่นจะพบว่าทุกแฟรคชันมีค่าความเป็นกรดสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการวัดพีเอชของน้ำส้มควันไม้ดิบเกิดขึ้นทันทีที่ทำการเผาเสร็จ จากนั้นส่วนหนึ่งของน้ำส้มควันไม้จะถูกเก็บไว้ในภาชนะเพื่อรอการกลั่น (2-4 สัปดาห์) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวอาจมีผลต่อการเปลี่ยนค่าความเป็นกรดของสารละลาย นอกจากนี้การใช้ความร้อนเพื่อแยกน้ำจะมีผลต่อการระเหยและเสถียรของสารเคมี จึงพบว่าค่าเป็นกรดเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายผ่านการกลั่นด้วยความร้อนสูงถึง 120°C (ความร้อนของแหล่งความร้อนรอบหม้อกลั่น) รวมทั้งความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องในระหว่างการเก็บเพื่อรอการตรวจวิเคราะห์

ตาราง 4.5 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันกลั่น พบว่าไม่ปรากฏแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่ออัตราความร้อน แต่ผลการทดลองพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของแฟรคชัน DW-1 มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากการกลั่นแฟรคชันแรกประกอบด้วยสารเคมีที่มีช่วงจุดเดือดต่ำ ความหนาแน่นต่ำ เช่น เมทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ผลการทดลองให้ของแฟรคชัน DW-3 มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุด เพราะสารเคมีที่อยู่ในส่วนกลั่นที่คงค้างในหม้อกลั่นเป็นสารเคมีที่มีช่วงจุดเดือดสูงสุด ซึ่งมักเป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้น สำหรับรูปที่ 4.5 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของทุกแฟรคชันต่ออัตราความร้อนต่างๆ ซึ่งพบว่าอัตราความร้อนไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.3 ค่าพีเอชและความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ดิบ

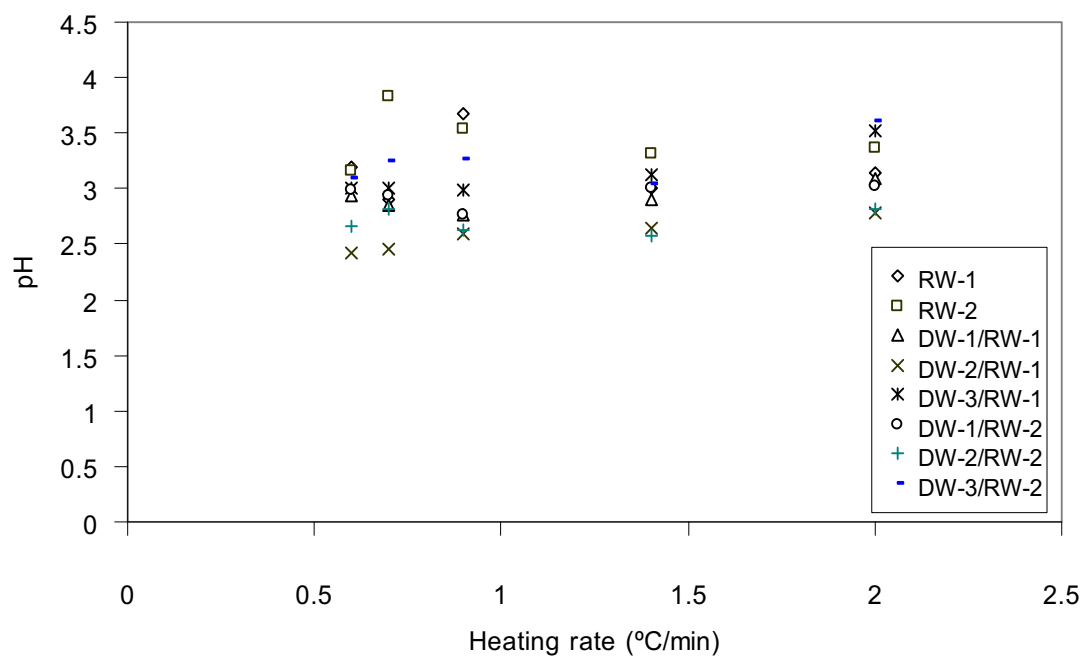
Heating rate (°C/min)	pH		Specific Gravity	
	RW-1	RW-2	RW-1	RW-2
0.6	3.20	3.16	1.011	1.009
0.7	2.90	3.83	1.014	1.016
0.9	3.68	3.54	1.012	1.010
1.4	3.00	3.31	1.012	1.015
2.0	3.15	3.37	1.024	1.027

ตารางที่ 4.4 พีเอชของน้ำส้มควันไม้กลั่น

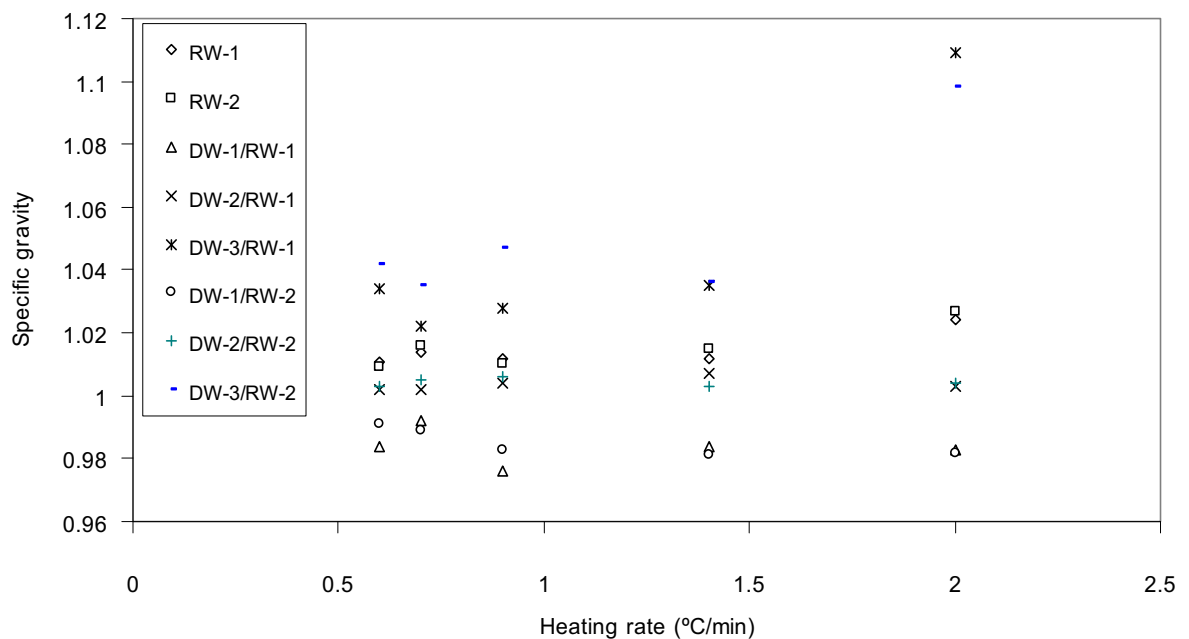
Heating rate (°C/min)	RW-1			RW-2		
	DW-1	DW-2	DW-3	DW-1	DW-2	DW-3
0.6	2.93	2.42	3.01	2.98	2.67	3.10
0.7	2.85	2.46	3.01	2.93	2.81	3.25
0.9	2.77	2.60	2.99	2.76	2.63	3.26
1.4	2.91	2.64	3.12	3.00	2.57	3.04
2.0	3.09	2.79	3.52	3.02	2.81	3.61

ตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้กลั่น

Heating rate (°C/min)	RW-1			RW-2		
	DW-1	DW-2	DW-3	DW-1	DW-2	DW-3
0.6	0.984	1.002	1.034	0.991	1.003	1.042
0.7	0.992	1.002	1.022	0.989	1.005	1.035
0.9	0.976	1.004	1.028	0.983	1.006	1.047
1.4	0.984	1.007	1.035	0.981	1.003	1.036
2.0	0.983	1.003	1.109	0.982	1.004	1.082



รูปที่ 4.4 พีเอชของน้ำส้มควันไม้



รูปที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้

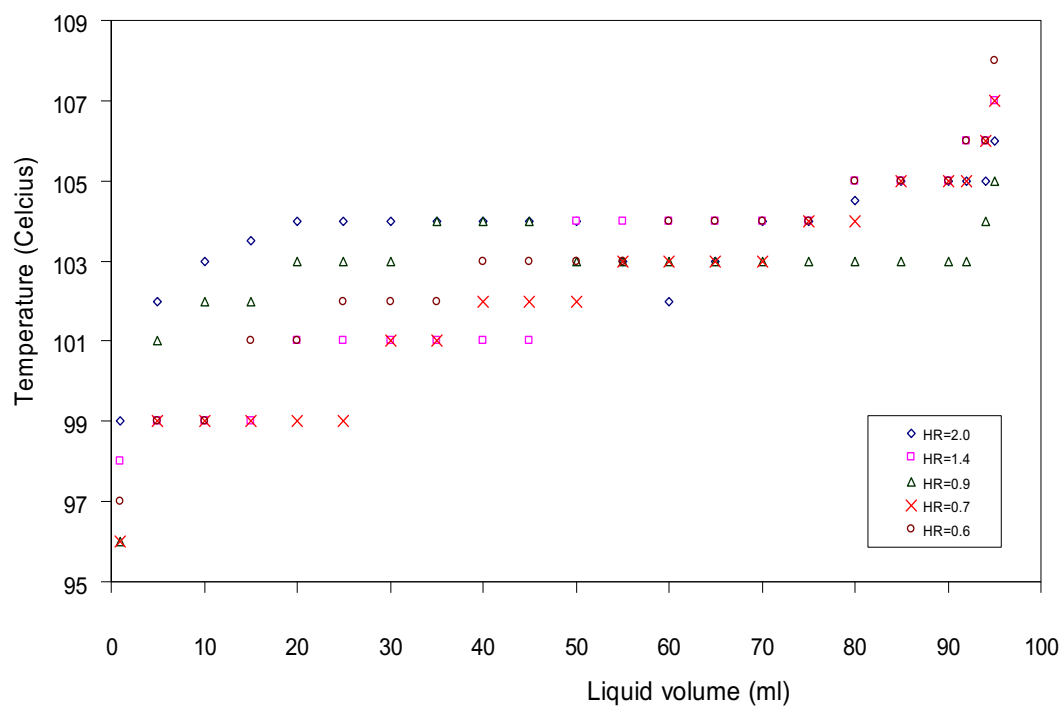
4.4 ช่วงอุณหภูมิเดือดของน้ำส้มควันไม้

ผลการวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้ที่ได้ตลอดทั้งกระบวนการผลิต ณ อัตราความร้อนต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 พบว่าช่วงอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยประมาณที่ 96-108°C ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิเดือดแคบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทั้งนี้เป็นเพราะองค์ประกอบหลักของน้ำส้มควันไม้เป็นน้ำนั่นเอง ถึงแม้ว่าน้ำส้มควันไม้จะมีสารเคมีหลายชนิดก็ตาม แต่ด้วยปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำ จึงทำให้อุณหภูมิเดือดอยู่ภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิเดือดของน้ำ ณ ความดันบรรยากาศ

จากผลการทดลองพบว่าอัตราความร้อนของการเผาไหม้ไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อช่วงอุณหภูมิเดือด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่วงอัตราความร้อนในการทดลองเป็นช่วงแคบ ทำให้ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบในน้ำส้มควันไม้คือชนิดไม้ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนโดยมวลระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและสารแทรกอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวต่างๆ (ดีไฮเดรชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน ดีพอลิเมอไรเซชัน) การไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาออกซิเดชัน การที่น้ำส้มควันไม้มีช่วงอุณหภูมิเดือดที่แคบจะทำให้การกลั่นแยกส่วนทำได้ง่ายขึ้น เพราะแต่ละส่วนจะมีช่วงที่แคบมาก รวมทั้งจำเป็นต้องใช้อัตราการกลั่นที่ต่ำเพื่อเก็บองค์ประกอบอื่นๆ ให้มากที่สุด

ตารางที่ 4.6 ช่วงอุณหภูมิเดือดของน้ำส้มควันไม้ ณ อัตราความร้อนต่างๆ

Heating rate ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Boiling range ($^{\circ}\text{C}$)
2.0	99-106
1.4	98-107
0.9	96-105
0.7	96-106
0.6	97-108

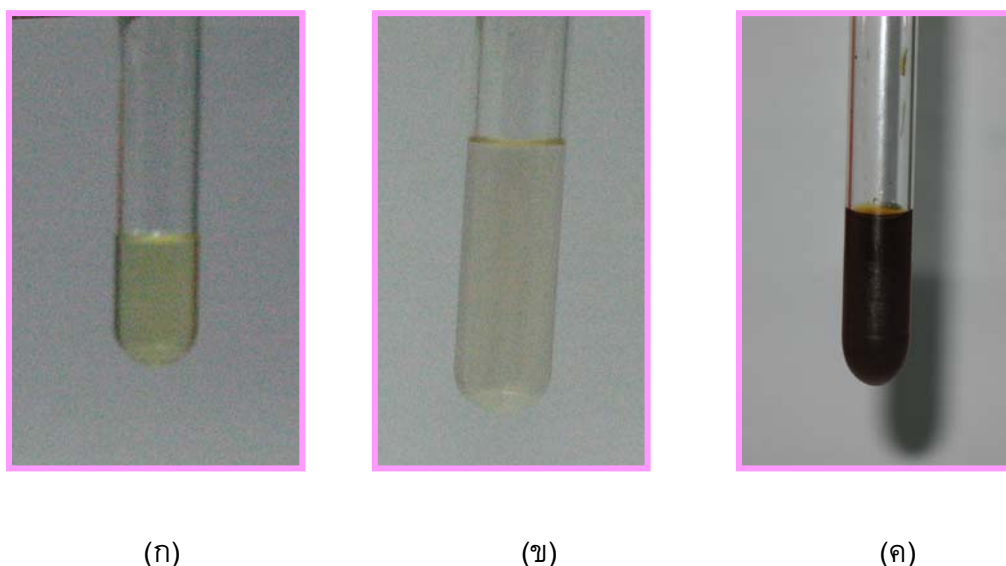


รูปที่ 4.6 ช่วงอุณหภูมิเดือดน้ำส้มควันไม้ด้วยเครื่องกลั่น ASTM D86 ที่อัตราความร้อน (HR: $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) ต่างๆ

4.5 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS และ GC

ผลการทดลองหาชนิดสารในน้ำส้มควันไม้ด้วยเครื่อง GC/MS แสดงได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วยกรดคาร์บอกซิลิก อัลกอฮอล์ คีโตน อัลดีไฮด์ และกลุ่มที่มาจากการสลายตัวของลิกนิน เช่น ฟีนอล กัวออล ฟูแรน เป็นต้น ชนิดสารเคมีที่ได้เป็นผลมาจากปฏิกิริยา อนุกรมการสลายตัวขององค์ประกอบไม้เนื้อแข็ง เช่น การพบสารเคมีกลุ่มคาร์บอกซิลิก ได้แก่ กรดอะซิติกเกิดขึ้นจากการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นผลมาจากกลุ่มอะซิทธิลระหว่างการไพโรไลซิส นอกจากนี้การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสยังได้เป็นเมทานอล เฟอร์ฟูรอล อัลดีไฮด์ และคีโตน ในทำนองเดียวกันการพบสาร Maltol และสารกลุ่ม cyclopentenolones เป็นผลมาจากการสลายตัวของเซลลูโลส การพบแอลกอฮอล์ 1-Hydroxy-2-butanone (ในรายงานของ Demirbas, 2002 ได้รวมสาร 1-Hydroxy-2-propanone) ในกระบวนการไพโรไลซิสทั่วไป (แบบช้า) มักพบได้น้อยและมีปริมาณน้อยเช่นกัน ทั้งนี้เพราะ 1-Hydroxy-2-butanone (และ 1-Hydroxy-2-propanone) มีความเสถียรต่ำ สำหรับฟีนอลและอนุพันธ์เป็นผลมาจากการสลายตัวของลิกนินระหว่างการไพโรไลซิส ตัวอย่างของสารที่ได้จากการสลายตัวในกลุ่มลิกนินได้แก่ guaiacol, cresol, 2,6-dimethoxyphenol ดังนั้นองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้จึงมีจำนวนมาก ซึ่งพบสารส่วนใหญ่เหล่านี้ในงานวิจัยนี้

การแสดงผลการวิเคราะห์อยู่บนฐานของภาพรวมของแต่ละแฟรคชันที่ได้จากเตาเผา (RW-1 และ RW-2) และแฟรคชันการกลั่นที่ใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1 และ RW-2 สำหรับลักษณะทางกายภาพของแต่ละแฟรคชันแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สีของน้ำส้มควันไม้กลั่น (ก) DW-1 (ข) DW-2 (ค) DW-3

ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแฟรคชัน DW-3 ที่สีน้ำตาลเข้มจัดและมีความหนืดสูง ในขณะที่แฟรคชัน DW-1 และ DW-2 มีลักษณะใส หรือมีสีเหลืองใสคล้ายน้ำ

ผลการวิเคราะห์ด้วย GC/MS พบการกระจายขององค์ประกอบหลักที่สามารถระบุชนิดได้นั้นมีความคล้ายกันทุกแฟรคชันเมื่ออยู่ในกลุ่มเดียวกัน เช่น DW-1/RW-1 มีการกระจายองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับ DW-1/RW-2 ในทำนองเดียวกันแฟรคชัน DW-2/RW-1 มีการกระจายองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับ DW-2/RW-2 เช่นกัน นอกจากนี้การกระจายองค์ประกอบเหล่านี้ในแฟรคชันน้ำส้มควันไม้ดิบ RW-1 คล้ายคลึงกับ RW-2 ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาการสลายตัวของไม้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นกับอุณหภูมิ โดยการเปลี่ยนแปลงมีขั้นตอนดังนี้ การสลายตัวเริ่มด้วยกลุ่มเฮมิเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 200-260 °C จากนั้นตามมาด้วยการสลายตัวของกลุ่มเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 240-350 °C สุดท้ายเป็นการสลายตัวของกลุ่มลิกนินที่อุณหภูมิ 280-500 °C ซึ่งในทางปฏิบัติการสลายตัวของไม้ดำเนินอย่างช้าๆ อุณหภูมิในเตาเผาเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เช่นกัน ดังนั้นปฏิกิริยาการสลายตัวจึงเกิดขึ้นในหลายๆ ส่วนของไม้พร้อมกัน เพราะในขณะที่บางส่วนของไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก แต่บางส่วนอุณหภูมิอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการสลายตัว ดังนั้นแก๊สที่ได้จากการสลายตัวจึงออกมาพร้อมๆ กัน ทำให้องค์ประกอบที่พบในแฟรคชัน RW-1 คล้ายคลึงกับ RW-2

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำส้มควันไม้ RW-1 เมื่อเทียบกับน้ำส้มควันไม้กลั่นทั้งสามแฟรคชันดังรูปที่ 4.8-4.11 พบว่า จำนวนพีคของน้ำส้มควันไม้ RW-1 มีจำนวนมากกว่าน้ำส้มควันไม้กลั่น ยกเว้นในแฟรคชันกลั่นที่สาม โดยพบช่วงเวลาการกระจายพีคของ RW-1 เริ่มตั้งแต่เวลาที่ 4-23 ในขณะที่การกระจายพีคของแฟรคชัน DW-1 DW-2 และ DW-3 เป็นนาฬิกาที่ 4-18, 4-20 และ 2-30 ตามลำดับ การพบจำนวนองค์ประกอบในน้ำส้มควันไม้ดิบ RW-1 ไม่แตกต่างไปจากการน้ำส้มควันไม้กลั่น น่าจะมาจากขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้ จำเป็นต้องทำการเจือจางในอัตราส่วน 100 เท่าเชิงปริมาตร จึงนำส่งผลกระทบต่อความไวในการตรวจวิเคราะห์ หากมีองค์ประกอบบางตัวในปริมาณที่น้อยอยู่แล้ว ในขณะที่การวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้กลั่น ได้ใช้การเจือจางในอัตราส่วน 20 เท่าเชิงปริมาตร (ทั้งนี้การทำการเจือจางขึ้นกับการเจือจางน้ำส้มควันไม้ดิบได้เริ่มทดลองการเจือจางในช่วง 10-1000 เท่า พบว่าการวิเคราะห์ด้วยสัดส่วน 100 เท่าให้ผลดีที่สุด ทั้งนี้ดูจากการความชัดเจนของการบ่งชี้ของพีค เช่น การเจือจางในอัตรา 10 เท่า พบว่ามีการซ้อนทับกันของพีค ทำให้ยากต่อการบ่งชี้ชนิด อย่างไรก็ตามหากทำการเจือจางสูงมาก เช่น 1000 เท่า พบว่าปริมาณพีคได้ลดลงอย่างมาก โดยพบเฉพาะองค์ประกอบหลักเพียงบางชนิดเท่านั้น เช่น กรดอะซิติก เมทานอล เป็นต้น)

สำหรับการบ่งชี้ชนิดสารในกลุ่ม อะซิโตน เมทานอล ฟอร์มิก (ช่วงเวลาที่พบ 2.0-2.6 นาที) จากเครื่องวิเคราะห์ GC/MS พบว่า เครื่องมือไม่สามารถวิเคราะห์สารเคมีในกลุ่มดังกล่าวได้ ทั้งนี้เป็นเพราะพีคของสารเหล่านี้อยู่ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน ทำให้พีคของสารเกิดการทับซ้อนกันได้ ดังนั้นความสามารถในการบ่งชี้จึงลดลง (ในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์ใช้ temperature ramp เป็น 5 °C/min ทำให้การบ่งชี้สารเคมีที่มีจุดออกใกล้เคียงกันทำได้ยาก

นั่นเอง) อย่างไรก็ตามการแสดงผลในส่วนของ GC/MS ได้รวมสารในกลุ่มเหล่านี้ โดยใช้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC

การบ่งชี้ชนิดสารจากการวิเคราะห์ GC-MS ในงานวิจัยนี้มีหลักการพิจารณาจากค่าคุณภาพ (quality) ซึ่งดูจากสเปกตรัมของพีคที่ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารมาตรฐานในฐานข้อมูลของ Wiley 275.L สำหรับข้อมูลการวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำส้มควันไม้ดิบจากเตาแฟรคชัน RW-1 พบว่าการกระจายของพีคมีจำนวนไม่น้อยกว่า 23 พีคหลักๆ แต่สามารถบ่งชี้ชนิดได้ชัดเจนเพียงบางชนิดเท่านั้น ได้แก่ พีคที่เวลา 10.10, 13.06, 13.64, 15.27, 17.43 นาที โดยพีคที่เวลา 10.10 นาทีนั้น สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเป็น furfural alcohol โดยค่าคุณภาพเป็น 91% เมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นๆ ที่มีค่าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามสำหรับพีคที่เวลา 13.06 นาที พบว่าความเป็นไปได้ในการบ่งชี้ชนิดสารมีจำนวน 3 ชนิด ซึ่งทุกสารมีค่าคุณภาพใกล้เคียงกัน คือ

1. 2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl- 94%
2. 1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl- 91%
3. Cyclotene 91%

เนื่องจากการบ่งชี้สารอยู่บนฐานของค่าคุณภาพสูงสุด ซึ่งในที่นี้เลือกชนิดเป็น 2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl- อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้สูงที่อาจเป็นสารตัวที่ 2 หรือ 3 ก็ได้ เนื่องจากมีรายงานการพบ Cyclotene ในน้ำส้มควันไม้จากพืชชนิดอื่นด้วยเช่นกัน

สำหรับพีค ณ เวลาที่ 6.0 นาที พบว่าพีคมีลักษณะเบ้ซ้ายและมีช่วงเวลากว้าง ทำให้การบ่งชี้ทำได้ยากขึ้น ทั้งนี้ช่วงเวลาที่กว้างส่งผลทำให้มีโอกาสการทำนายครอบคลุมถึงสารตัวอื่นๆที่แสดงในช่วงเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะพีคนำประกอบด้วยพีคย่อยด้วย โดยพบว่าพีคที่เกิดขึ้นมียอดพีคเกิดขึ้นตลอดช่วงที่มีการเบ้ของกราฟ ดังนั้นจึงพบว่าคุณภาพการบ่งชี้มีค่าต่ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วย GC ที่สภาวะเดียวกันนี้พบว่าพีค ณ ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นกรดอะซิติก ดังนั้นการบ่งชี้จึงระบุเป็นกรดอะซิติก เพราะกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำส้มควันไม้ นอกจากนี้ความเป็นไปได้ของการระบุพีคที่ซ้อนทับอยู่ในช่วงนี้อาจเป็นกรดฟอร์มิก อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วย GC ได้ยืนยันองค์ประกอบของกรดฟอร์มิกเช่นกัน

ลักษณะของพีคขึ้นกับชนิดของสาร เช่น พีคของสารมาตรฐานกรดอะซิติกมีการเบ้ซ้าย ในขณะที่พีคของ 3-furaldehyde เป็นลักษณะพีคปกติ เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจพบการทับซ้อนของพีคได้ เช่น พีคของกรดอะซิติกครอบคลุมพีคของ 3-furaldehyde จึงพบว่ามี การซ้อนทับของพีคในช่วงการเบ้ซ้ายของพีคกรดอะซิติก เกิดเป็นยอดพีคที่สองในพีคใหญ่ของกรดอะซิติก จึงผลกระทบต่อการหาปริมาณของ 3-furaldehyde นอกจากพื้นที่ใต้กราฟของกรดอะซิติกก็อาจมี 3-furaldehyde รวมอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งได้จากการทดลอง

การผสมสารมาตรฐานของกรดอะซิติกและ 3-furaldehyde ในช่วงความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของ 3-furyldehyde ต่อกรดอะซิติก

สำหรับพีคที่เวลา 20.03 นาที พบว่าค่าคุณภาพของการระบุชนิดสาร Phenol, 3,4-dimethoxy- เป็น 80% อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่มีข้อมูลยืนยันชนิดของสาร รวมทั้งค่าคุณภาพไม่ถึง 90% ทำให้การยืนยันผลการทดลองทำได้ยาก อย่างไรก็ตามกลุ่มสารที่มีค่าคุณภาพสูงเป็นกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอลและผลจาก GC ยืนยันการพบฟีนอล

สำหรับพีคที่เวลา 21.24 นาทีพบว่าค่าคุณภาพอยู่ในช่วง 27-64% ดังนั้นการระบุชนิดสารเคมีจึงทำได้ยาก เนื่องจากขาดข้อมูลยืนยัน นอกจากนี้ชนิดของสารยังกระจายอยู่ในหลายกลุ่ม เช่น Benzoic acid, Pyridine ฯลฯ ทำให้ไม่สามารถระบุชนิดสารในพีคนี้ได้

สำหรับพีคที่เวลา 18.53 นาทีพบว่าค่าคุณภาพมีค่าต่ำมาก โดยอยู่ในช่วง 3-7% เท่านั้น นอกจากนี้กลุ่มสารที่พบในฐานข้อมูลมีความหลากหลาย รวมทั้งการไม่มีข้อมูลอื่นๆ ประกอบการตัดสินใจ ทำให้ไม่สามารถระบุชนิดสารในพีคนี้ได้

การเปรียบเทียบพีคของกรดอะซิติก ณ เวลา 6.0 นาที ของน้ำส้มควันไม้ดิบของแฟรคชัน RW-1 และน้ำส้มควันไม้ดิบของแฟรคชัน RW-2 พบว่า พีคของกรดอะซิติกในส่วนสองมีการซ้อนทับของพีคมากกว่าส่วนหนึ่งอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งอาจบ่งถึงจำนวนสารในช่วงเวลาดังกล่าวของ RW-2 ที่มากกว่า RW-1 ถึงแม้ว่าชนิดสารเคมีในฐานข้อมูลจะใกล้เคียงกัน สำหรับการวิเคราะห์ GC-MS กับตัวอย่างน้ำส้มควันไม้สภาวะอื่นๆ ได้แสดงผลและวิเคราะห์ด้วยหลักการที่ได้กล่าวในข้างต้นดังรูปที่ 4.15-4.17

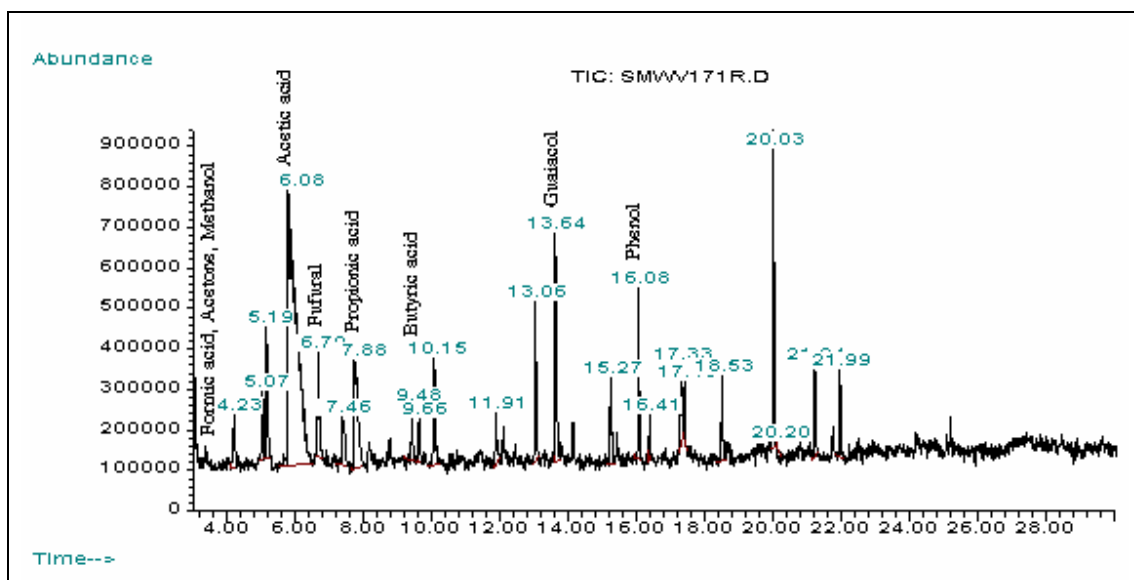
นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วย GC-MS ยังพบสารเคมีที่ยังระบุชนิดไม่ได้จำนวนมาก เนื่องจากจำนวนพีคที่ได้จากการวิเคราะห์มีเป็นจำนวนมาก แต่ไม่สามารถตรวจพบว่าเป็นชนิดใด ทั้งนี้เพราะในการวิเคราะห์ด้วย GC-MS จำเป็นต้องเจือจางน้ำส้มควันไม้ ดังนั้นสารชนิดใดก็ตามที่มีปริมาณน้อยจะส่งผลทำให้ความไวของเครื่องที่จะตรวจพบและระบุได้ชัดเจนลดต่ำลงมาก อย่างไรก็ตามผลการทดลองมีความแปรปรวนในการทำนายชนิดสารเคมี ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของเครื่องวิเคราะห์ GC/MS เช่น ความไวของเครื่องมือวิเคราะห์ต่อการบ่งชี้ชนิดสารขึ้นกับปริมาณและองค์ประกอบของสารเคมีในระบบ ดังนั้นหากตัวอย่างประกอบด้วยสารเคมีจำนวนมากและการตอบสนองของสารนั้นๆอยู่ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกันแล้ว ความสามารถในการบ่งชี้ชนิดสารจะลดต่ำลง

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วย GC/MS ของน้ำส้มควันไม้

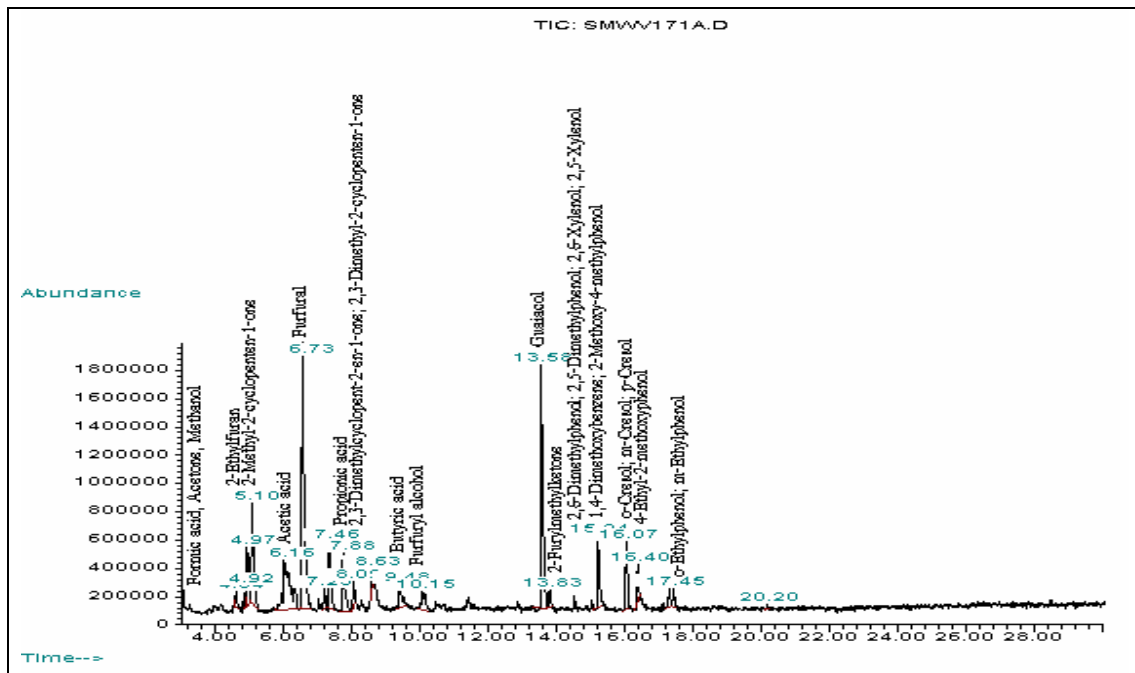
Substance	RW-1	RW-2	RW-1 (Distillation)			RW-2 (Distillation)		
			DW-1	DW-2	DW-3	DW-1	DW-2	DW-3
Acetic acid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Propionic acid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Formic acid	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*
Butyric acid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Methanol	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Acetone	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*
2-Cyclopenten-1-one				✓			✓	
2-Methyl-2-cyclopenten-1-one			✓	✓		✓	✓	
2,3-Dimethylcyclopent-2-en-1-one			✓	✓		✓	✓	
2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one			✓	✓		✓	✓	
2-Hydroxy-2-cyclopenten-1-one					✓			✓
2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one					✓			✓
1,4-Dimethoxybenzene			✓	✓		✓	✓	
4-Methoxy-2-methyl-1-(methylthio)benzene					✓			✓
Maltol					✓			✓
Furfural	✓	✓	✓			✓		
Furfuryl alcohol			✓	✓	✓	✓	✓	
2-Furylmethylketone			✓			✓		
Guaiacol	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Phenol	✓	✓			✓			✓
o-Cresol			✓	✓	✓	✓	✓	✓
m-Cresol			✓	✓	✓	✓	✓	✓
p-Cresol			✓	✓	✓	✓	✓	✓
2-Methoxy-4-methylphenol			✓	✓		✓	✓	
4-Ethyl-2-methoxyphenol			✓	✓		✓	✓	
o-Ethylphenol			✓	✓		✓	✓	
m-Ethylphenol			✓	✓		✓	✓	
2-Ethylfuran			✓			✓		

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วย GC/MS ของน้ำส้มควันไม้ (ต่อ)

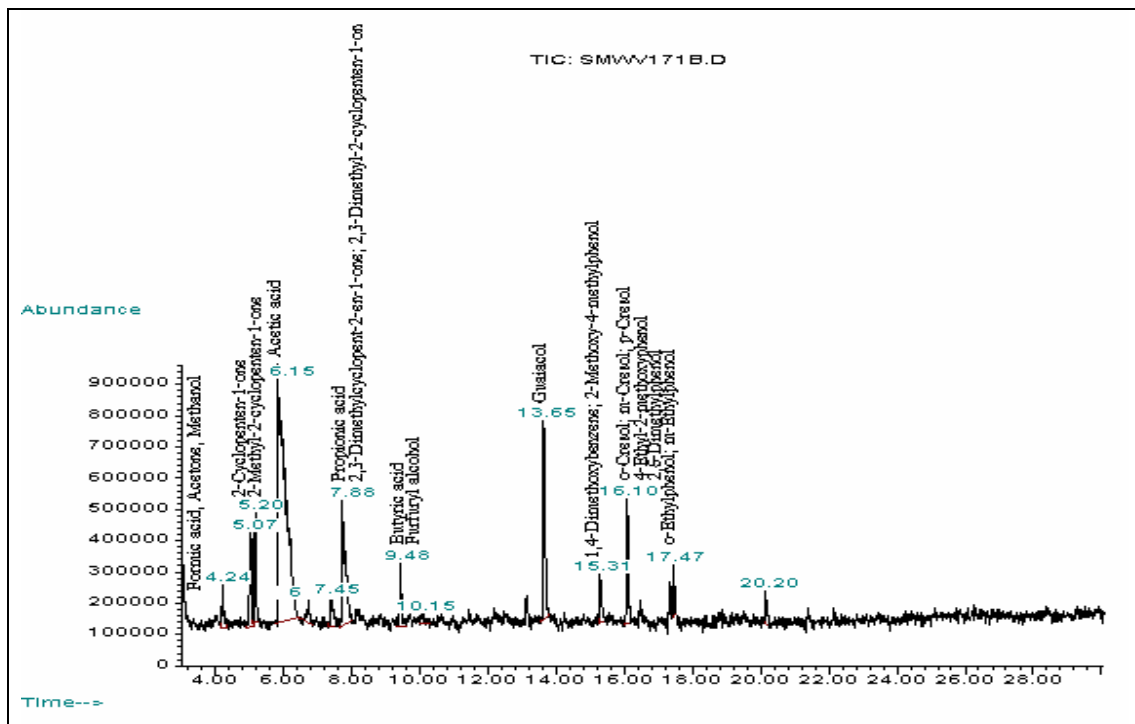
Substance	RW-1	RW-2	RW-1 (Distillation)			RW-2 (Distillation)		
			DW-1	DW-2	DW-3	DW-1	DW-2	DW-3
2,6-Dimethylphenol			✓	✓	✓	✓	✓	✓
2,5-Dimethylphenol			✓			✓		
2,6-Xylenol			✓			✓		
2,5-Xylenol			✓			✓		
2,6-Dimethoxyphenol					✓			✓
Phloretin					✓			✓
4-Hydroxy-3,5-dimethoxy-benzaldehyde					✓			✓
Pyridine					✓			✓
1-Hydroxy-2-butanone					✓			✓
Dihydro, 2(3H)-Furanone					✓			✓
2-Furanone					✓			✓



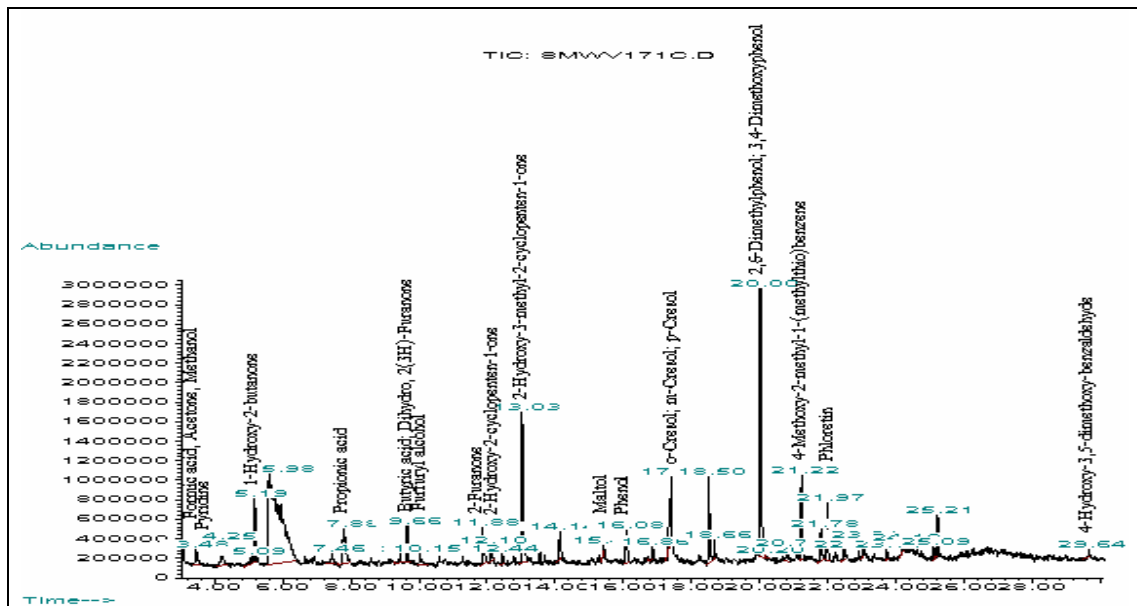
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน RW-1 เทียบกับเวลา (นาที) ณ อัตราความร้อน 1.4 °C/min



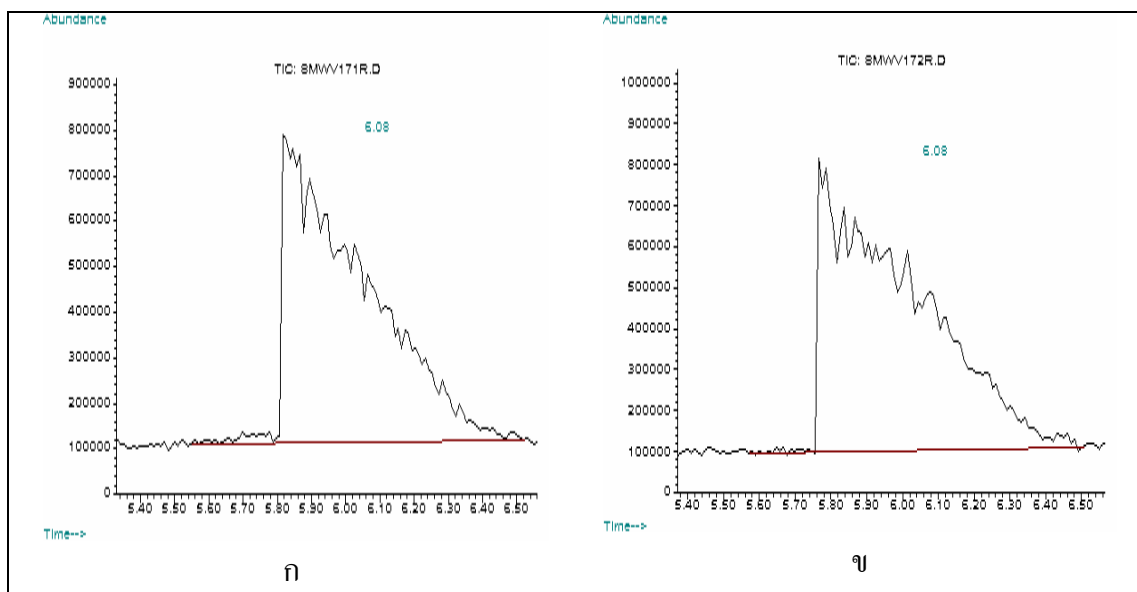
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้กลั่นแฟรคชัน DW-1 โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1 เทียบกับเวลา (นาที)



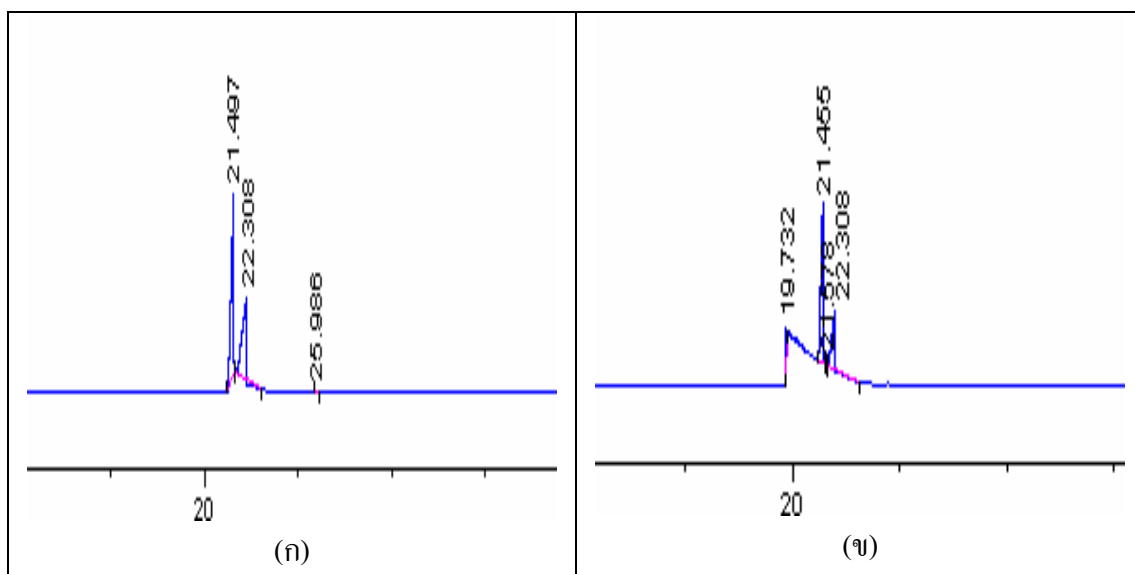
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้กลั่นแฟรคชัน DW-2 โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1 เทียบกับเวลา (นาที)



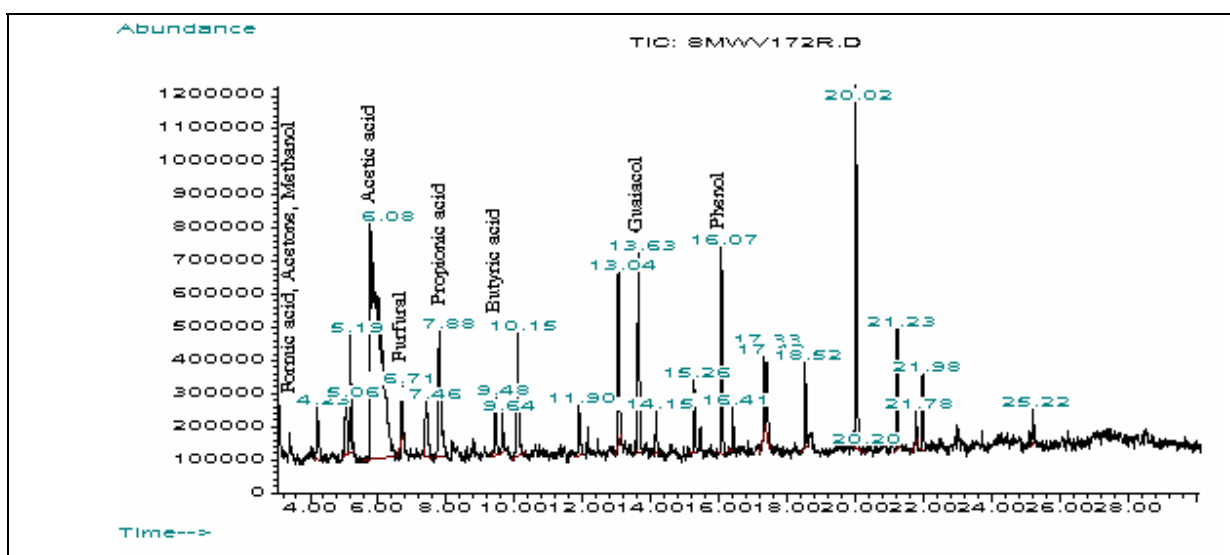
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้กลิ่นแพรคชัน DW-3 โดยใช้สารป้อนเป็นแพรคชัน RW-1 เทียบกับเวลา (นาที)



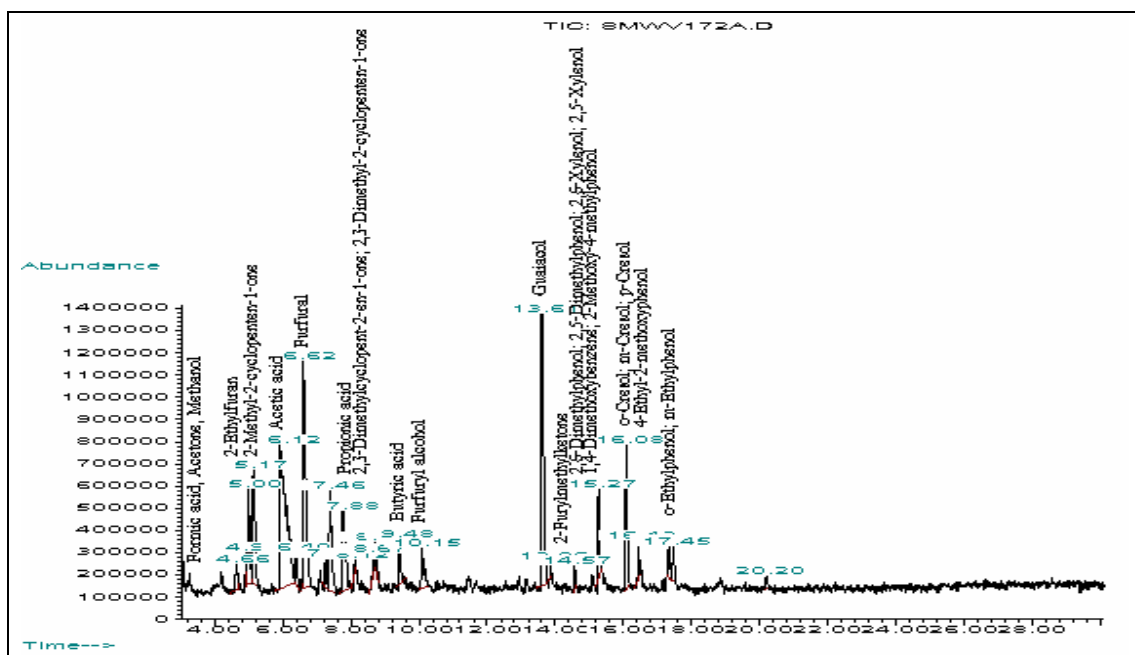
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ช่วงพีคของกรดอะซิติกด้วย GC/MS ของน้ำส้มควันไม้ (ก) แพรคชัน RW-1 และ (ข) แพรคชัน RW-2



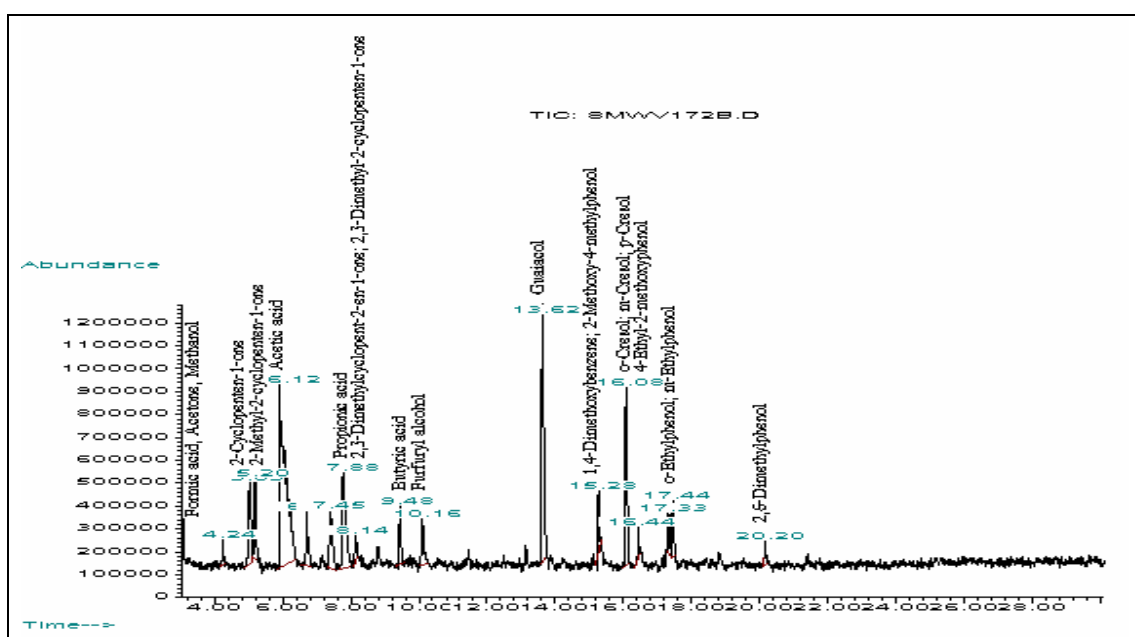
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของสารมาตรฐานกรดอะซิติก และ 3-Furaldehyde ที่ความเข้มข้น (ก) เท่ากัน และ (ข) ความเข้มข้นของกรดอะซิติกเป็น 5 เท่าของ 3-Furaldehyde



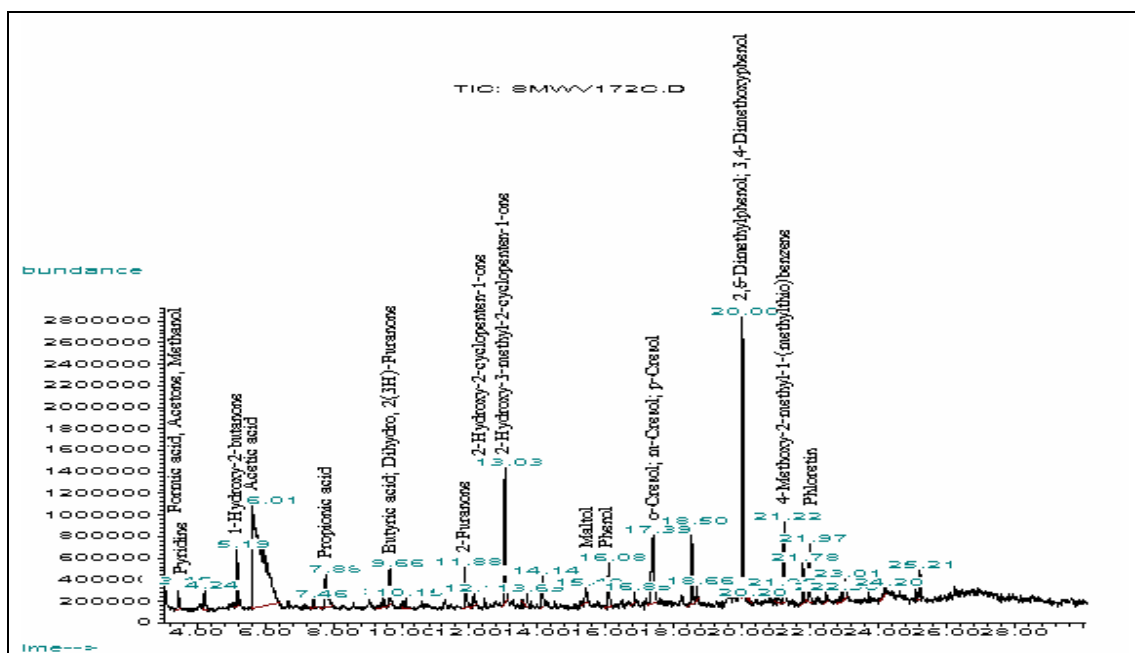
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน RW-2 เทียบกับเวลา (นาที)



รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้กลั่นแฟรคชัน DW-1 โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2 เทียบกับเวลา (นาที)



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้กลั่นแฟรคชัน DW-2 โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2 เทียบกับเวลา (นาที)



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้กลิ่นแพรคชัน DW-3 โดยใช้สารป้อนเป็น แพรคชัน RW-2 เทียบกับเวลา (นาที)

การวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบหลักในน้ำส้มควันไม้ด้วยเครื่อง GC แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยผลการทดลองพบการกระจายตัวของสารเคมีส่วนใหญ่ในทุกแพรคชันและแตกต่างกันเฉพาะปริมาณที่พบ เช่น แพรคชัน DW-1 พบปริมาณอะซิโตนและเมทานอลสูงสุด ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิเดือดของสารทั้งสองมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ โดยการระเหยเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในแพรคชัน DW-2 และ DW-3 ในขณะที่องค์ประกอบกลุ่มฟีนอลและอนุพันธ์ที่มีจุดเดือดสูงจะพบในแพรคชัน DW-3 เป็นหลัก สำหรับองค์ประกอบหลักของน้ำส้มควันไม้ดิบได้แก่กรดอะซิติก นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่พบมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเมทานอลจากไม้ชนิดอื่น (เปอร์เซ็นต์เมทานอล 1.0-1.5%) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไม้ยางพาราเป็นไม้ให้น้ำยาง จึงเกิดสารกลุ่มแอลกอฮอล์ได้ดี สำหรับสารกลุ่มรักษาไม้ (preservative) พบว่ามีปริมาณกัวอาคอลลีซอลและอนุพันธ์ฟีนอลเช่นกัน โดยมีแนวโน้มพบในแพรคชัน RW-2 ที่สูงกว่าแพรคชัน RW-1 สำหรับแพรคชัน DW-2 มีปริมาณกรดอะซิติกสูงสุด ทำให้มีผลต่อค่า pH ที่ต่ำเมื่อเทียบกับแพรคชันอื่นๆ ในทำนองเดียวกันแพรคชัน RW-1 มีแนวโน้มพบองค์ประกอบในกลุ่มกรดสูงกว่า RW-2 แต่พบกลุ่มอนุพันธ์ฟีนอลในแพรคชัน RW-2 มากกว่าแพรคชัน RW-1 ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3 และการวิเคราะห์ในหัวข้อ GC/MS

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วย GC ไม่สามารถรายงานผลได้ครบตามชนิดสารที่พบใน GC/MS ทั้งนี้เป็นเพราะพีคที่ได้ ณ เวลาที่พบในน้ำส้มควันไม้มีการเบี่ยงเบนออกไปจากเวลาที่ควรจะได้จากสารมาตรฐาน ทำให้ยกเว้นการรายงานปริมาณของสารหลายตัว ข้อสังเกตที่

ได้จากการกลั่นแยกพบว่าการกระจายตัวของสารเคมีในทุกแฟรคชัน ซึ่งอาจแสดงถึงประสิทธิภาพการกลั่นแยกที่ไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก

1. การสะสมตัวขององค์ประกอบหนักบางตัวในระบบกลั่น เช่น การพบสารที่มีอุณหภูมิสูงในแฟรคชันเบา เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบชุดกลั่นแบบแพคกิ้งต้องมีการปรับเปลี่ยนแพคกิ้งที่สะดวก หรืออาจต้องใช้การกลั่นแยกแบบง่ายหรือการระเหยเพื่อกำจัดกลุ่มองค์ประกอบหนักออกในเบื้องต้น แล้วจึงใช้ชุดกลั่นแพคกิ้งเพื่อแยกองค์ประกอบออกเป็นส่วนๆ ได้ตามต้องการ

2, ประสิทธิภาพการกลั่นที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ ยอดหอกลั่นได้ ทั้งนี้เนื่องจากอาจเกิดการสูญเสียความร้อนในระหว่างการแยกภายในคอลัมน์ ทำให้การหุ้มด้วยฉนวนเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอ

ตารางที่ 4.8 แฟรคชันเชิงมวลโดยน้ำหนักในน้ำส้มควันไม้ (ฐานของน้ำหนักแต่ละกระแส g/g stream)

Substance	RW-1	RW-2	RW-1 as feed			RW-2 as feed		
			DW-1	DW-2	DW-3	DW-1	DW-2	DW-3
Acetone	0.00027	0.00021	0.00679	0.000104	-	0.00429	0.00037	-
Acetic acid	0.04524	0.04259	0.03302	0.05125	0.02525	0.02795	0.05568	0.02413
Formic acid	0.00132	0.00124	0.01116	0.00095	0.00062	0.01653	0.00129	0.00004
Propionic acid	0.00250	0.00220	0.00378	0.00365	-	0.00720	0.00433	-
Butyric acid	0.00122	0.00182	0.00014	0.00016	0.00006	0.00220	0.00021	0.00008
Methanol	0.00215	0.00249	0.06774	0.00047	0.00008	0.08746	0.00022	0.00007
Furfural	0.00102	0.00132	0.00077	0.00089	0.00130	0.00130	0.00123	0.00138
Guaiacol	0.00029	0.00040	-	0.000075	0.00077	-	0.00026	0.00763
Phenol	0.00015	0.00026	0.00012	0.00016	0.00014	0.00030	0.00031	0.00012
p-Cresol	0.00010	0.00025	0.00007	0.000085	0.00013	-	0.00390	-
m-Cresol	0.00080	0.00072	-	0.00077	0.00087	-	0.00069	0.00079

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

1. อัตราความร้อนในเตามีผลต่อยิลด์ที่ได้ของน้ำส้มควันไม้ แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพีเอช ความถ่วงจำเพาะ และช่วงอุณหภูมิเดือด โดยพบว่าสภาวะการผลิตน้ำส้มควันไม้ที่ดีควรใช้ค่าอัตราความร้อนสูง
2. น้ำส้มควันไม้ดิบในงานวิจัยนี้มีค่าดังนี้ ยิลด์อยู่ในช่วง 21.91-29.01% ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 1.009-1.027 ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 2.9-4.09 และช่วงอุณหภูมิเดือดเป็น 96-108°C สำหรับลักษณะของสีที่ได้มีลักษณะสีเหลืองปนน้ำตาล และมีแนวโน้มเพิ่มความเข้มเมื่ออุณหภูมิการเก็บจากเตาส่งขึ้น
3. สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตจากงานวิจัยนี้คือ ณ อัตราความร้อน 1.4°C/min และอุณหภูมิเฉลี่ยสุดท้ายเป็น 560°C
4. กรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำส้มควันไม้ดิบ และได้ปริมาณเมทานอลที่สูงเมื่อเทียบกับไม้ชนิดอื่น สำหรับการพบองค์ประกอบในกลุ่มกรดมีแนวโน้มพบว่าแฟรคชัน RW-1 เป็นหลัก ในขณะที่เดียวกันกลุ่มฟีนอลจะพบในแฟรคชันที่ใช้อุณหภูมิการเผาที่สูง นอกจากนี้มีแนวโน้มพบสารกลุ่มฟีนอลและอนุพันธ์ฟีนอลในส่วนกลั่นที่มีอุณหภูมิเดือดสูงด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามทุกแฟรคชันมีความเป็นกรด สำหรับชนิดองค์ประกอบ (อย่างน้อย) โดยรวมของน้ำส้มควันไม้ยังพาราประกอบด้วยดังต่อไปนี้
 - Acetic acid
 - Propionic acid
 - Formic acid
 - Butyric acid
 - Methanol
 - Acetone
 - 2-Cyclopenten-1-one
 - 2-Methyl-2-cyclopenten-1-one
 - 2,3-Dimethylcyclopent-2-en-1-one
 - 2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one
 - 2-Hydroxy-2-cyclopenten-1-one
 - 2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one

- 1,4-Dimethoxybenzene
- 4-Methoxy-2-methyl-1-(methylthio)benzene
- Maltol
- Furfural
- Furfuryl alcohol
- Guaiacol
- Phenol
- o-Cresol
- m-Cresol
- p-Cresol
- 2-Methoxy-4-methylphenol
- 4-Ethyl-2-methoxyphenol
- o-Ethylphenol
- m-Ethylphenol
- 2-Ethylfuran
- 2,6-Dimethylphenol
- 2,5-Dimethylphenol
- 2,6-Xylenol
- 2,5-Xylenol
- 3,4-Dimethoxyphenol
- Phloretin
- Dihydro, 2(3H)-Furanone
- 2-Furanone
- 4-Hydroxy-3,5-dimethoxy-benzaldehyde
- Pyridine
- 1-Hydroxy-2-butanone

5.2 ข้อเสนอแนะ

การกลั่นแบบแพคกิ้งควรจะเป็นการกลั่นแยกที่ดี (ตามทฤษฎี) แต่เนื่องจากพบว่ามี การกระจายขององค์ประกอบบางตัวในบางแฟรคชัน จึงแสดงถึงจุดบกพร่องของเครื่องกลั่นนี้ ซึ่งพบว่าควรเพิ่มระบบควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอร่วมกับการใส่ฉนวนหุ้มคอลัมน์ และการควบคุม อุณหภูมิ ณ หม้อกลั่น อย่างไรก็ตามหากสามารถปรับปรุงเครื่องกลั่นนี้ในจุดเหล่านี้ได้ จะทำ ให้ได้เครื่องกลั่นที่สามารถกลั่นแยกองค์ประกอบเป็นส่วนๆ ทำให้สามารถแยกสารเคมีจำนวน มากออกเป็นกลุ่มๆ ให้เหมาะต่อการนำไปใช้งาน เช่น กลุ่มแอลกอฮอล์ กลุ่มกรด และ กลุ่มฟีนอล เป็นต้น

บรรณานุกรม

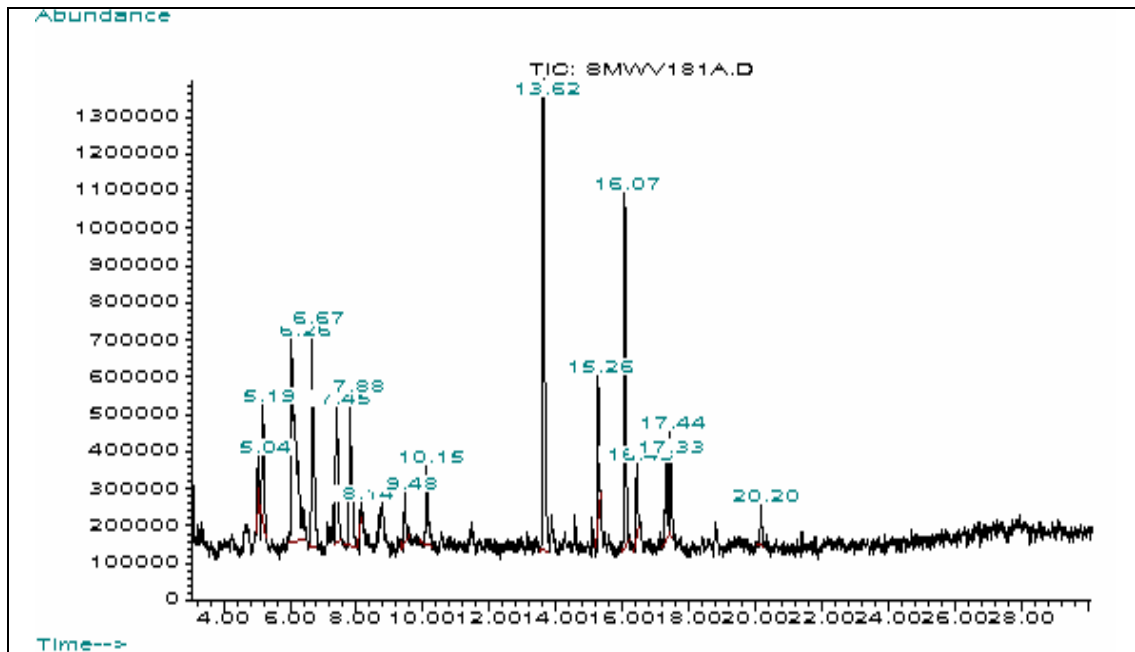
1. Bridgegewater A.V. and Bridge S.A., Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization, Elsevier Applied Science, London, 1991.
2. Demirbas A., Partly Chemical Analysis of Liquid Fraction of Flash Pyrolysis Products from Biomass in the Presence of Sodium Carbonate, Energy Conversion and Management, 43, 1801-1809, 2002.
3. Ferreira V.S., Rego I.N.C., Pastore F.Jr., Mandai M.M., Mendes L.S., Santos K.A.M., Rubim J.C. and Suarez P.A.Z., The Use of Smoke Acid as an Alternative Coagulating Agent for Natural Rubber Sheets' Production, Bioresource Technology, 96, 5, 605-609, 2005.
4. Goyal H.B., Seal D., and Saxena R.C., Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A Review, Renewable and Sustainable Energy Review, doi:10.1006/j.rser.2006.07.014, 2006.
5. Gullu D., and Demirbas A., Biomass to Methanol via Pyrolysis, Energy Conversion and Management, 42, 1349-1356, 2001.
6. Kadota M., and Niimi Y., Effects of Charcoal with Pyroligneous Acid and Barnyard Manure on Bedding Plants, Scientia Horticulturae, 101, 327-332, 2004.
7. Kartal S. N., Imamura Y., Tsuchiya F., and Ohsato K., Preliminary evaluation of fungicidal and termiticidal activities of filtrate from biomass slurry fuel production, Bioresource Technology, 95, 41 – 47, 2004.
8. Kazuo I., and Shohei S., Wood Having Durability Improved and Method for Improving Durability of Wood for This Purpose, Patent Abstract of Japan, JP 2003-311712, 2003.
9. Kumar B.G.P., Shivakamy K., Miranda L.R., and Velan M., Preparation of Steam Activated Carbon from Rubberwood Sawdust (*Hevea brasiliensis*) and Its Adsorption Kinetics, J. Hazardous Materials, B136, 922-929, 2006.
10. Kucuk M.M., and Demirbas A., Biomass Conversion Processes, Energy Conversion and Management, 38, 2, 151-165, 1996.
11. Lim, K.G. and Egashira, R., Pyrolysis and Characterization of the Product for Recycle of Rubberwood, Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2004), December 1-3, 2004, Thailand.
12. Loo A.Y., Jain K. and Darah I., Antioxidant and Radical Scavenging Activities of the Pyroligneous Acid from a Mangrove Plant, *Rhizophora apiculata*, Food Chemistry, 107, 300-307, 2007.

13. Masimi I. and Mitsuaki T., Dry-Distillation of Bamboo Material, Etc., Patent Abstract of Japan, JP07-034070, 1993.
14. Mu J., Uehara T. and Furuno T., Effect of Bamboo Vinegar on Regulation of Germination and Radical Growth of Seed Plants, J. Wood. Sci., 49, 262 – 270, 2003.
15. Nakai T., Kartel S. N., Hata T. and Imamura Y., Chemical Characterization of Pyrolysis Liquids of Wood-Based Composites and Evaluation of Their Bio-Efficiency, Building and Environment, 42, 1236-1241, 2007.
16. Online wood market, Available online: <http://www.108wood.com>, เมษายน 2550.
17. Sagehashi M., Nomura T., Shishido H., and Sakoda A., Separation of Phenols and Furfural by Pervaporation and Reverse Osmosis Membranes from Biomass-Superheated Steam Pyrolysis-Derived Aqueous Solution, Bioresource Technology, 98, 2018-2026, 2007.
18. Samesshima K., Sasaki M. and Samesshima I., Fundamental Evaluation on Termicidal Activity of Various Vinegar Liquids from Charcoal Making. Proceeding of the Fourth International Wood Science Symposium, September 2-5, 2002, Indonesia, 2002.
19. Sakasegawa M. and Yatagai M. Composition of Pyrolyzate from Japanese Green Tea, J. Wood Sci. 51, 73-76, 2005.
20. Srinivasakannan C., and Bakar M.Z.A., Production of Activated Carbon from Rubber Wood Aawdust”, Biomass and Bioenergy, 27, 89-96, 2004.
21. Takashi Y., Carbonizer for Wood, Etc., and Pyrolytic Furnace Used for It, and Cooling Recovery System, Patent Abstract of Japan, JP 2002-257311, 2002.
22. Tokujiro F., Distillation Apparatus, Patent Abstract of Japan, JP 2003-200001, 2003.
23. Yatagai M., Nishimoto M., Hori K., Ohira T., Shibata A., Termiticidal Activity of Wood Vinegar, Its Components and Their Homologues. Journal of Wood Science, 48, 338-342, 2002.
24. Yoshitoshi S., Shingo T., Hisanori K., and Takanobu Y., Method for Producing Wood Vinegar, Patent of Japan, JP2002-053867, 2002.
25. Yoshitoshi S., Shingo T., Hisanori K., and Takanobu Y., Method for Producing Wood Vinegar and Charcoal and Apparatus Therefore , Patent of Japan, JP 2002-053868, 2002.
26. Yukio Y., Bamboo Vinegar and Wood Vinegar and Method for Refining Them, Patent of Japan, JP2001-323282, 2001.
27. เคียงมูลพลังงานยั่งยืน, น้ำส้มควันไม้ ผลพลอยได้มูลค่าสูงจากการเผาถ่าน, Available online: <http://www.kiengmool.com>, เมษายน 2550.

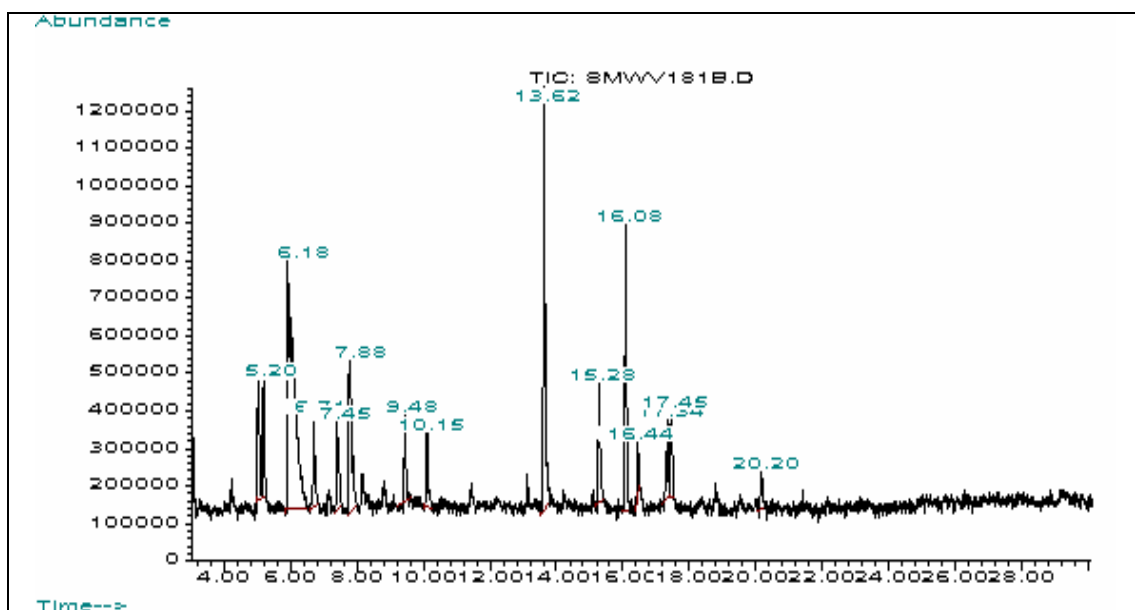
28. วรสร โพธิ์ทอง จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ และ กวินธิดา อธิกิจไพบูลย์, การศึกษาเบื้องต้นเพื่อประเมินคุณลักษณะน้ำส้มควันไม้จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา, การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 15, 27-28 ตุลาคม 2548, ชลบุรี, ประเทศไทย.
29. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, Available online: <http://www.rubberthai.com>, เมษายน 2550.
30. สุธารักษ์ บุญโชติ, การทำกลีเซอรินที่ได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันพืชให้บริสุทธิ์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2547.
31. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, การประชุมเชิงปฏิบัติการ การจัดทำข้อเสนอโครงการเรื่องน้ำส้มควันไม้ วันที่ 6 กันยายน 2547 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, 2547.
32. สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, Available online: <http://www.rubber.co.th>, เมษายน 2550.
33. ศูนย์สารนิเทศส่งเสริมการปลูกป่า กรมป่าไม้, ถ่านไม้และน้ำส้มควันไม้, Available online: <http://www.forest.go.th>, เมษายน 2550.
34. อุดุล กาญจนกิจ และ เอกพงศ์ หนูวงศ์, ผลพวงที่ได้จากการเผาถ่าน, ปริญญานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2538.

ภาคผนวก ก

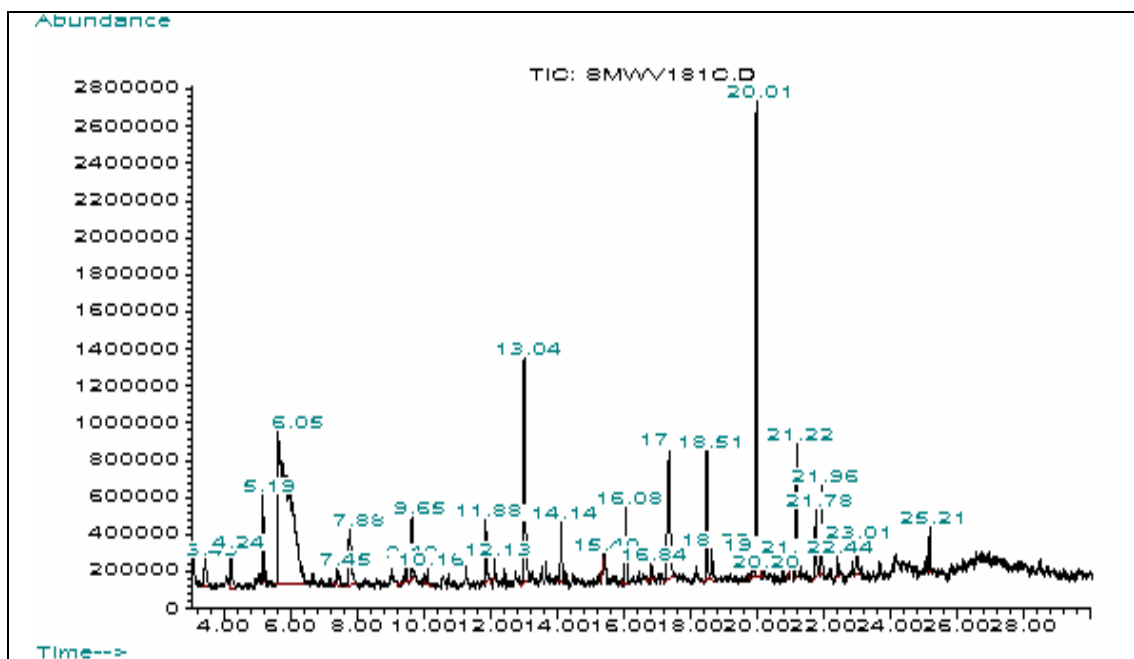
ตัวอย่างเพิ่มเติมการวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้ด้วย GC/MS



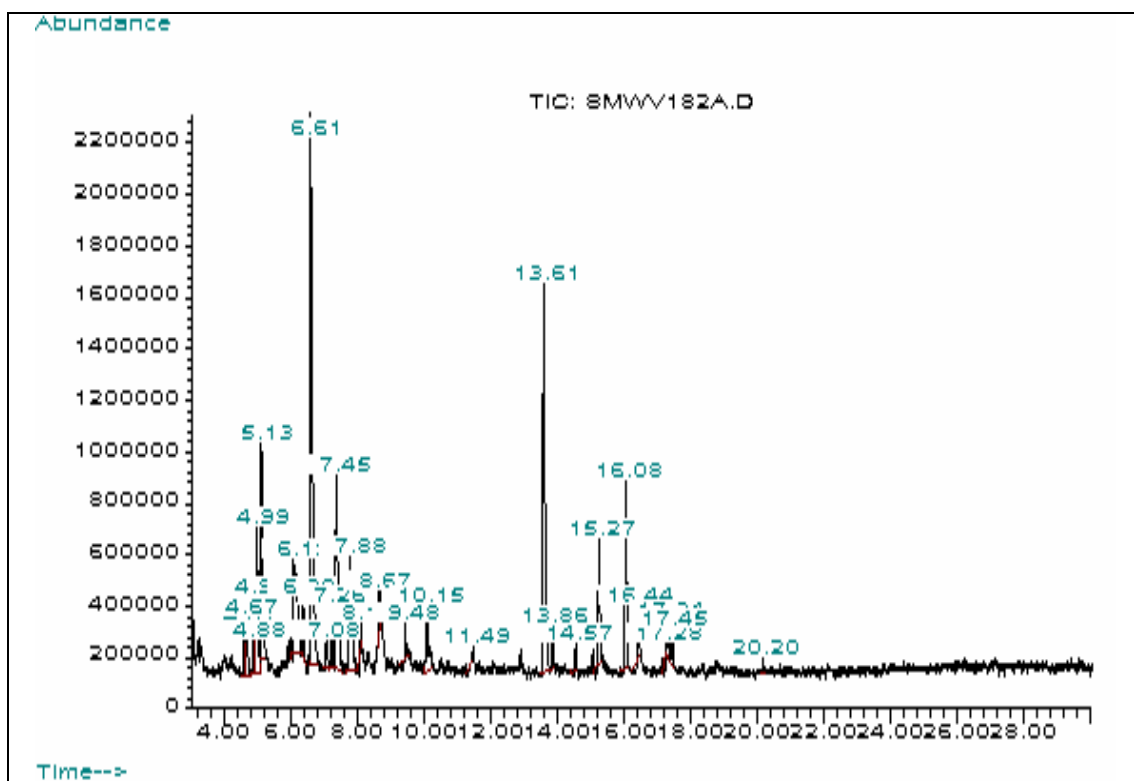
รูปที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-1 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



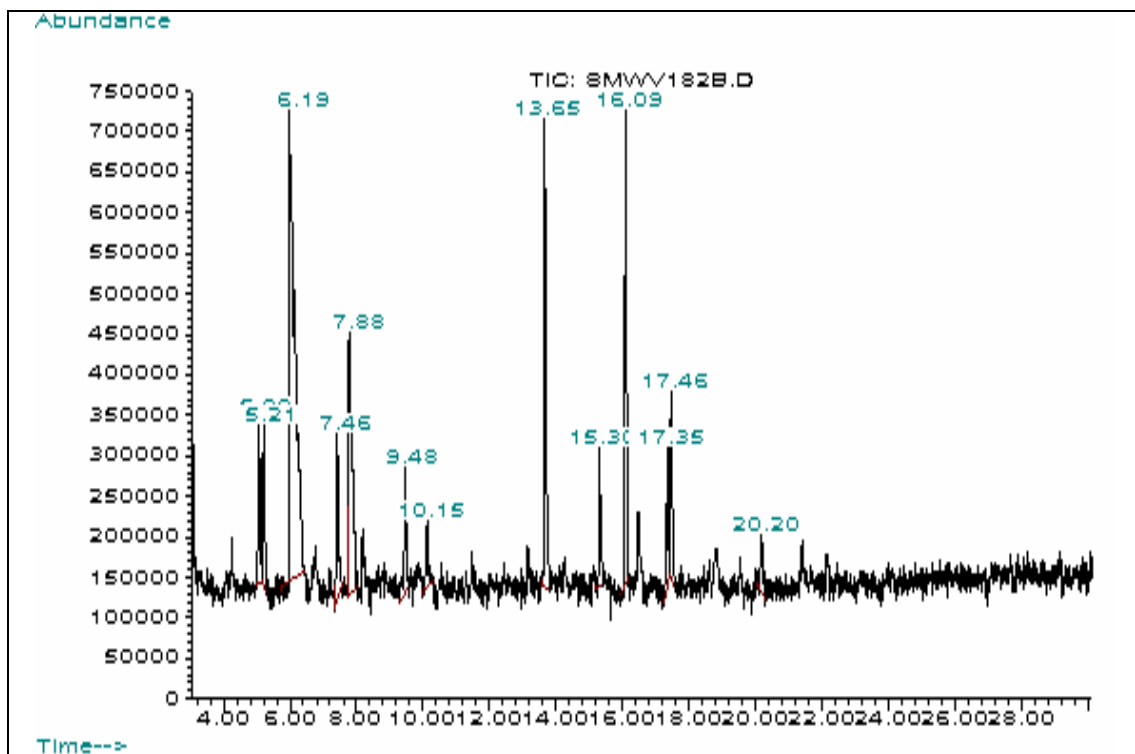
รูปที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-2 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



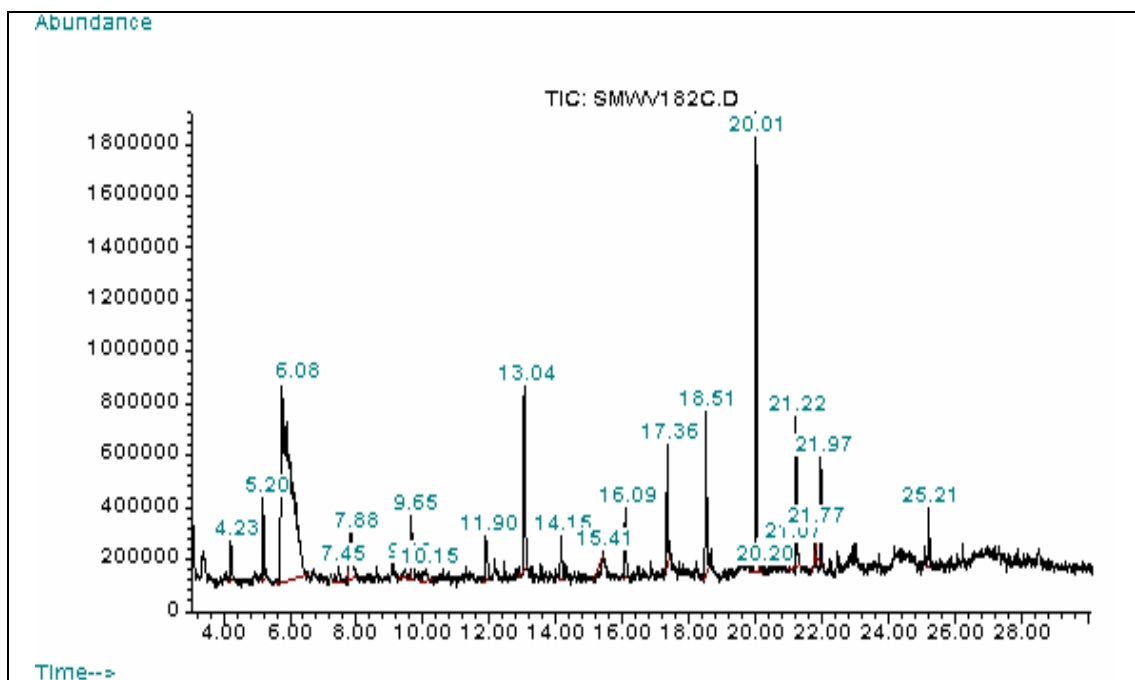
รูปที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-3 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



รูปที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-1 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2



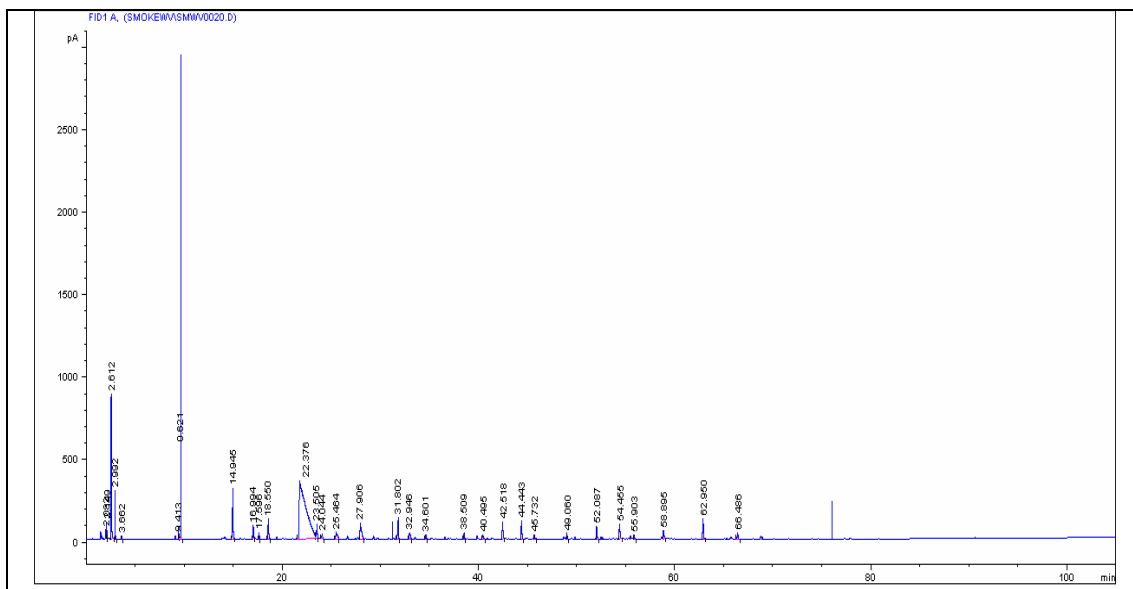
รูปที่ ก.5 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-2 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2



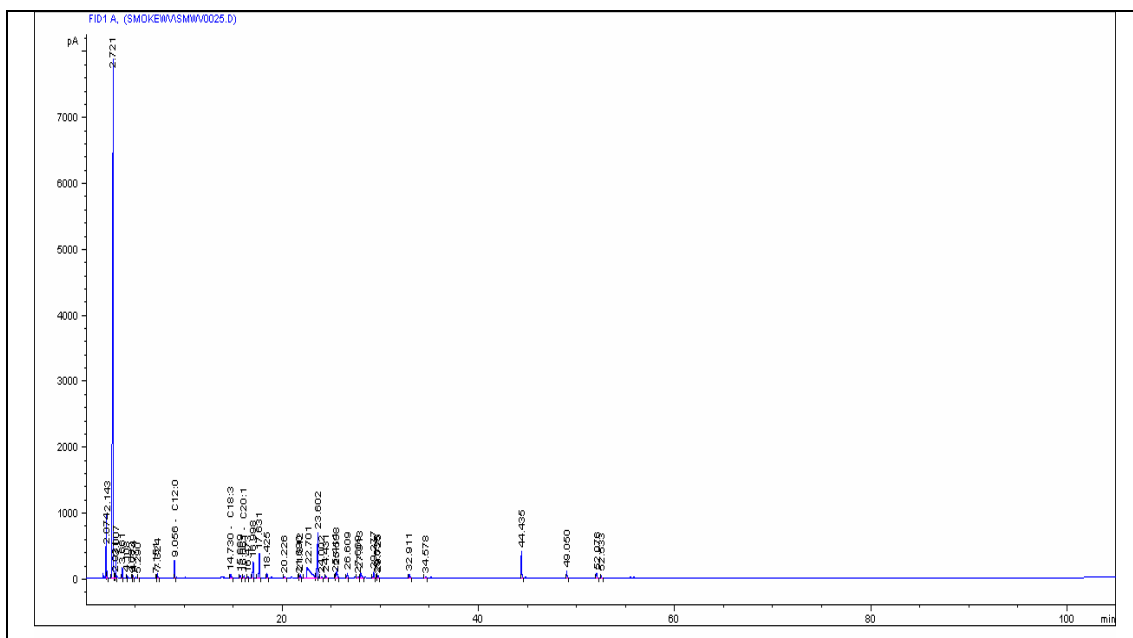
รูปที่ ก.6 ผลการวิเคราะห์ GC/MS ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-3 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2

ภาคผนวก ข

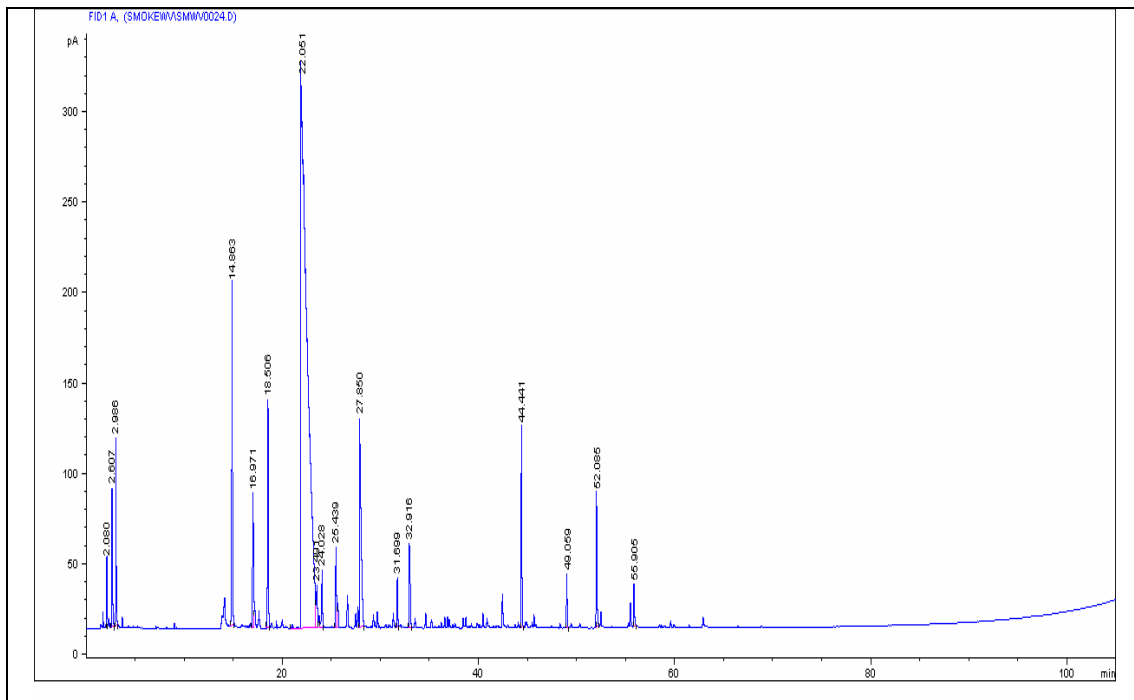
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้ด้วย GC/FID



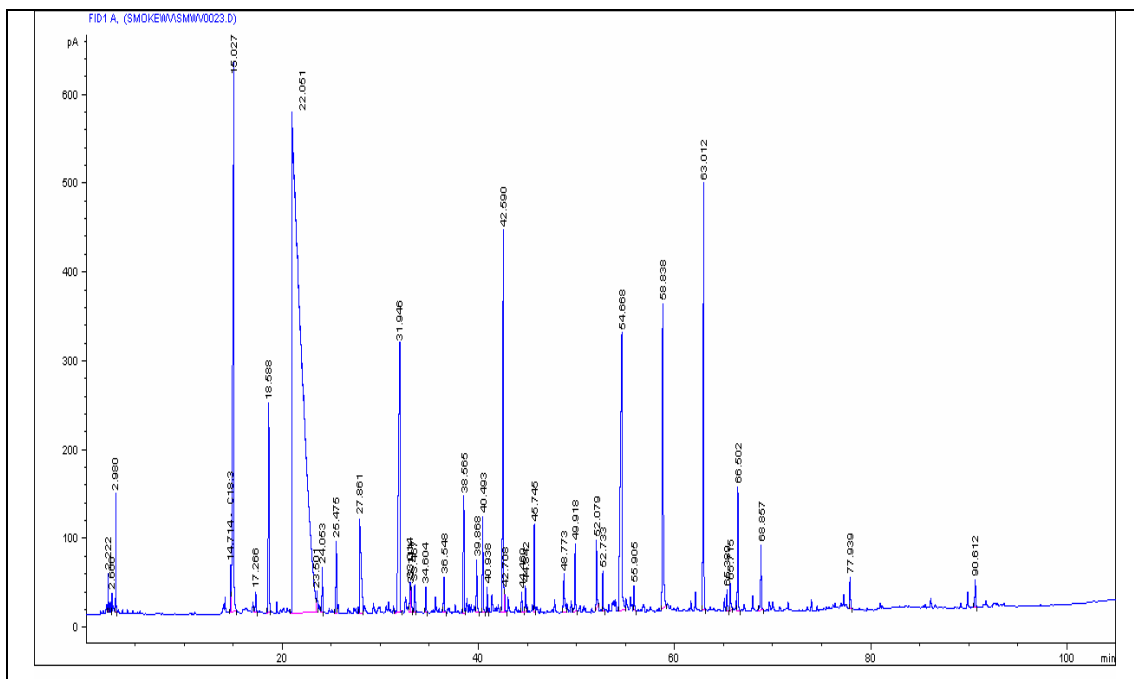
รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้ RW-1



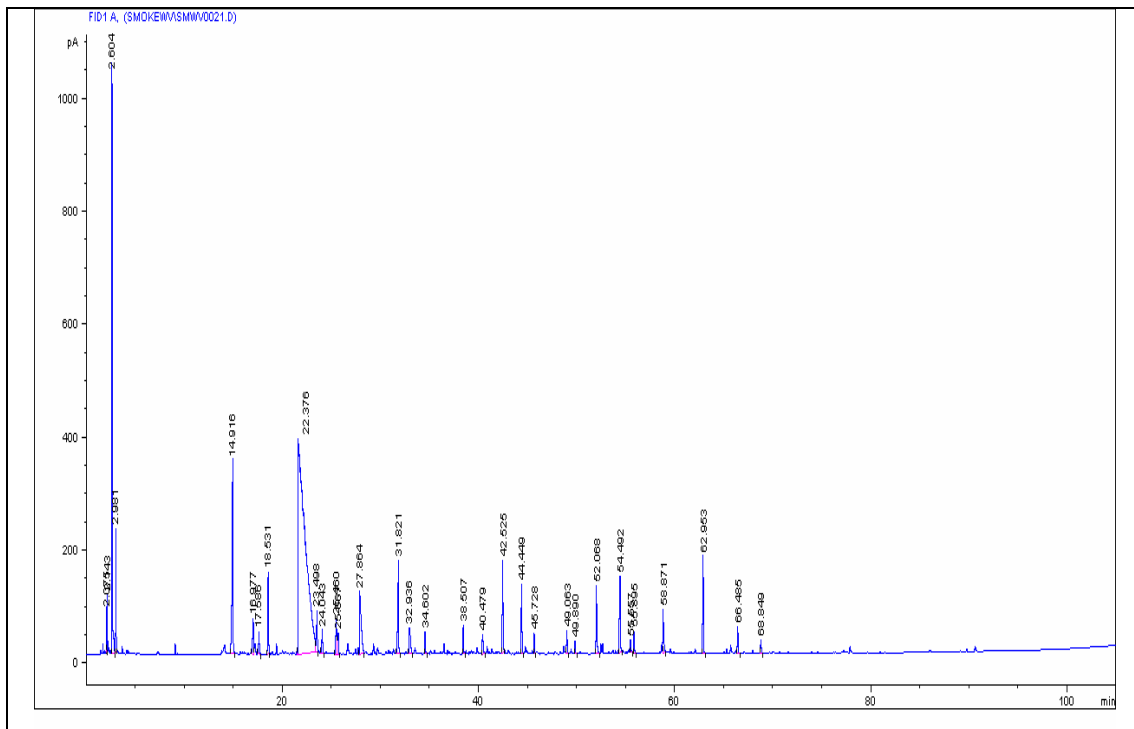
รูปที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-1 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



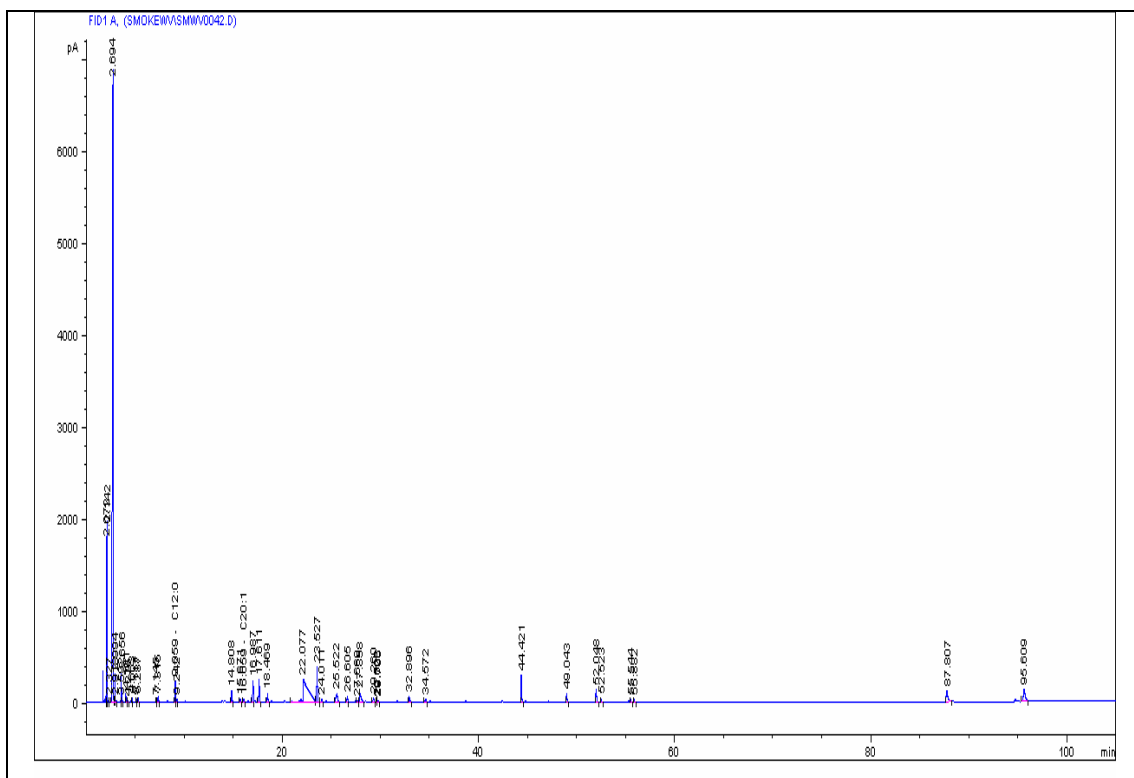
รูปที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-2 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



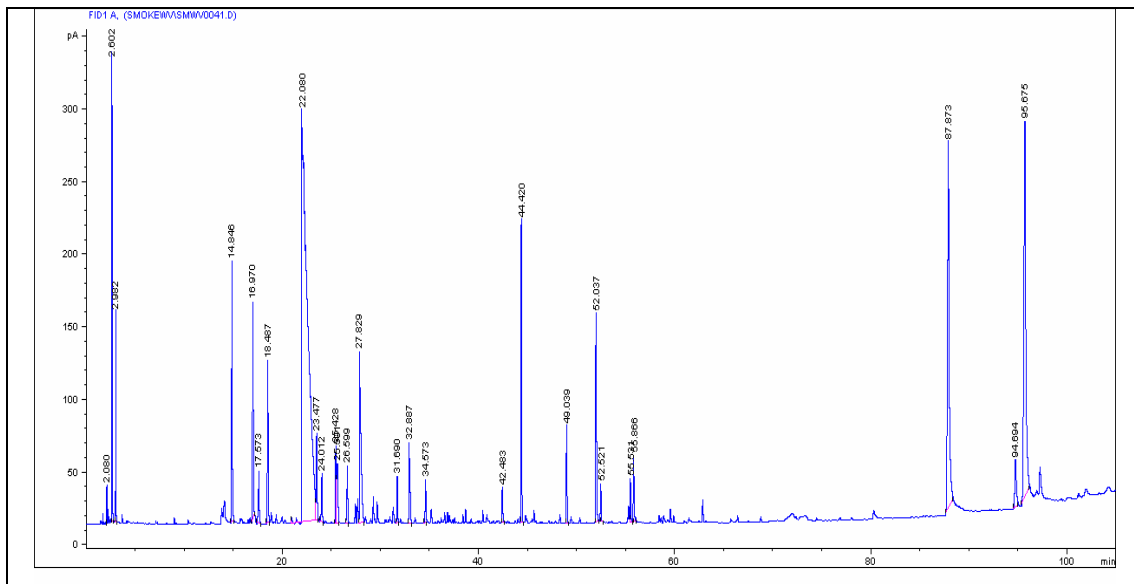
รูปที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-3 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



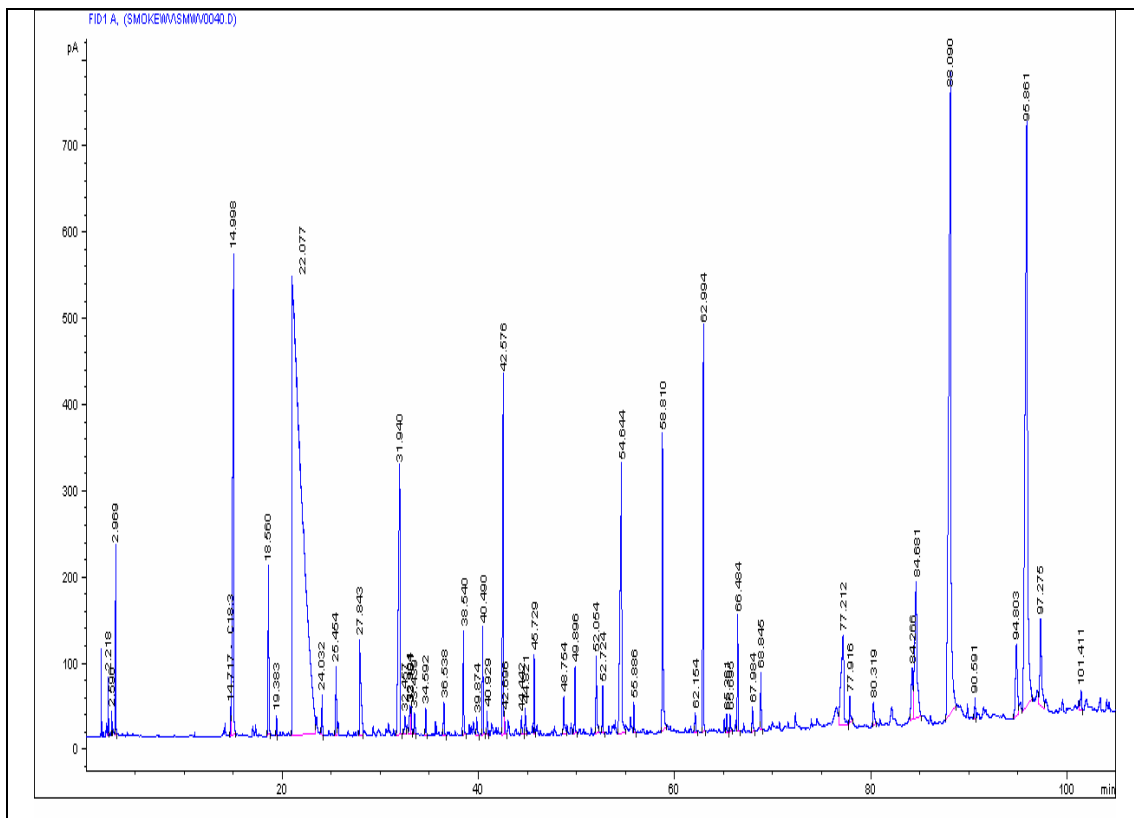
รูปที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน RW-2



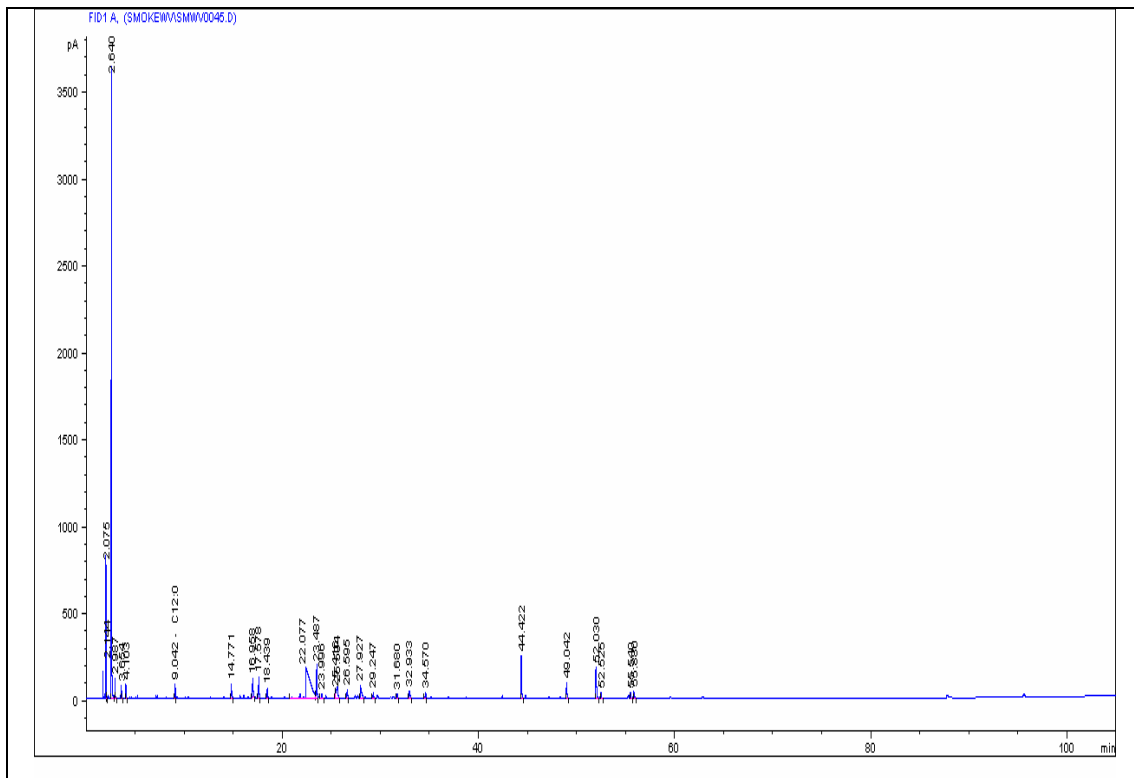
รูปที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-1 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2



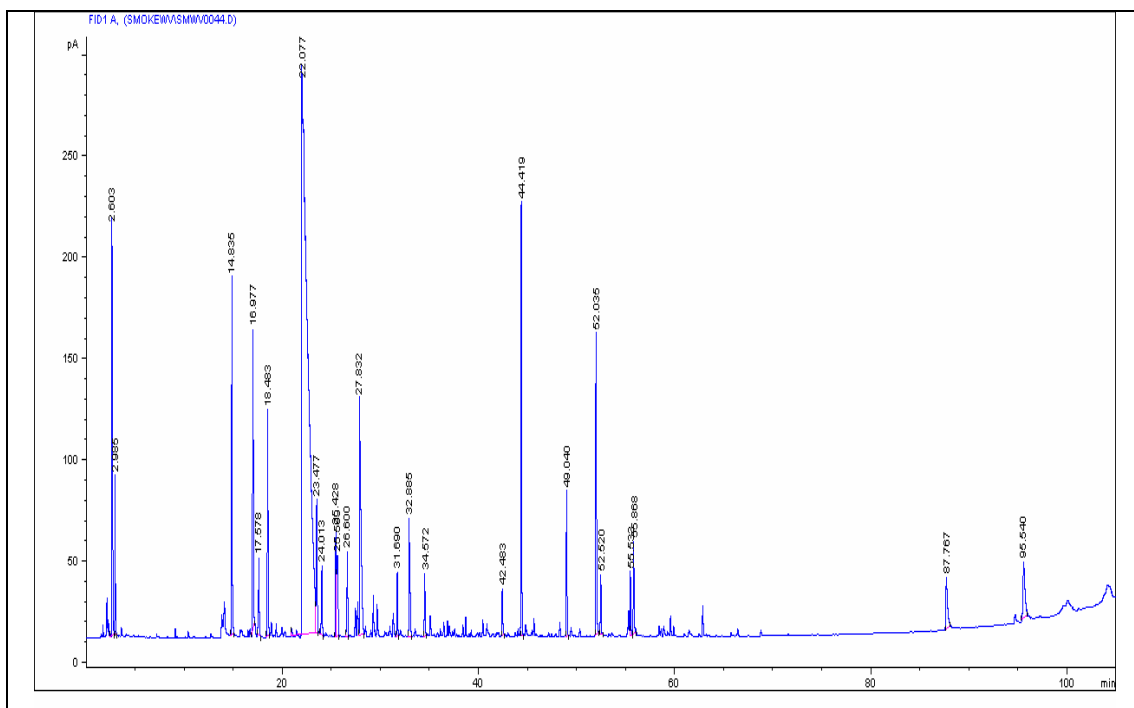
รูปที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แพรคชัน DW-2 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแพรคชัน RW-2



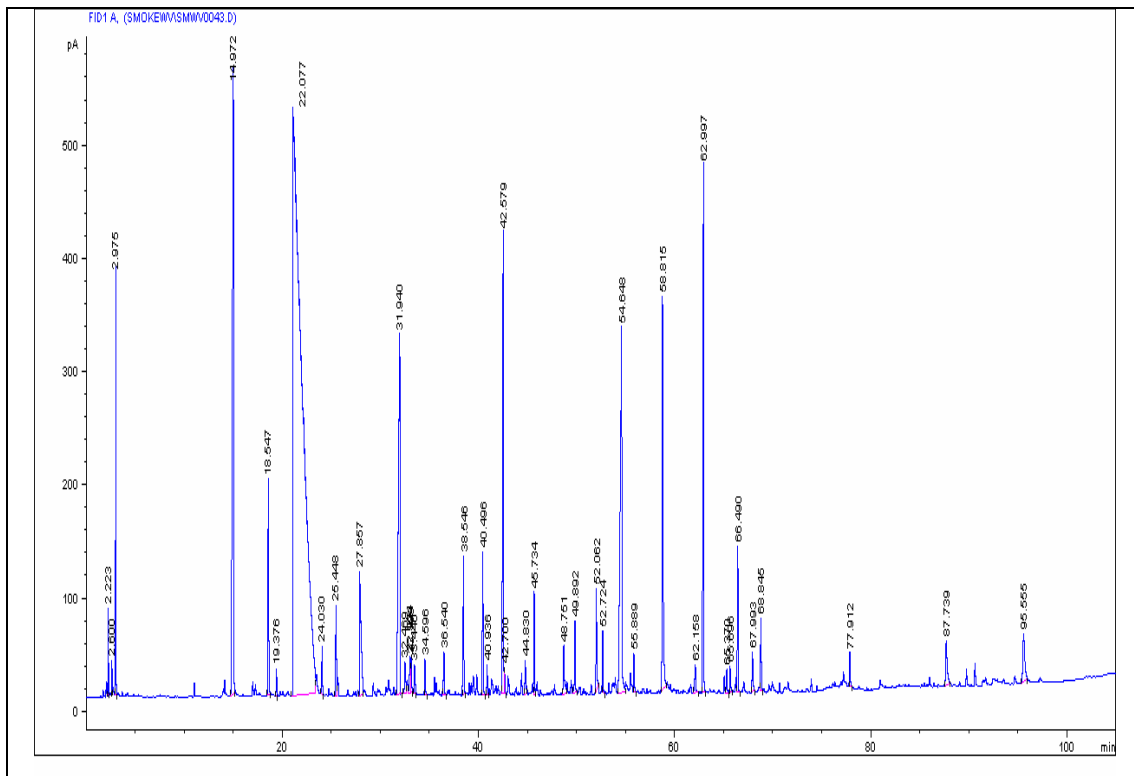
รูปที่ ข.8 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แพรคชัน DW-3 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแพรคชัน RW-2



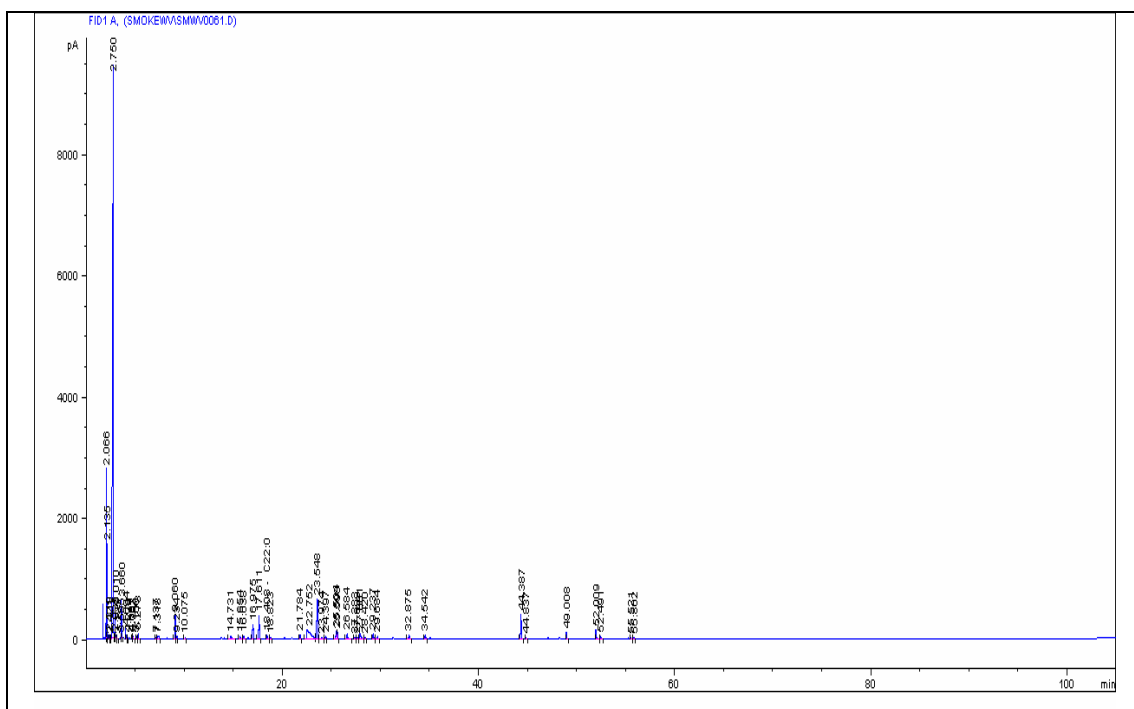
รูปที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-1 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1

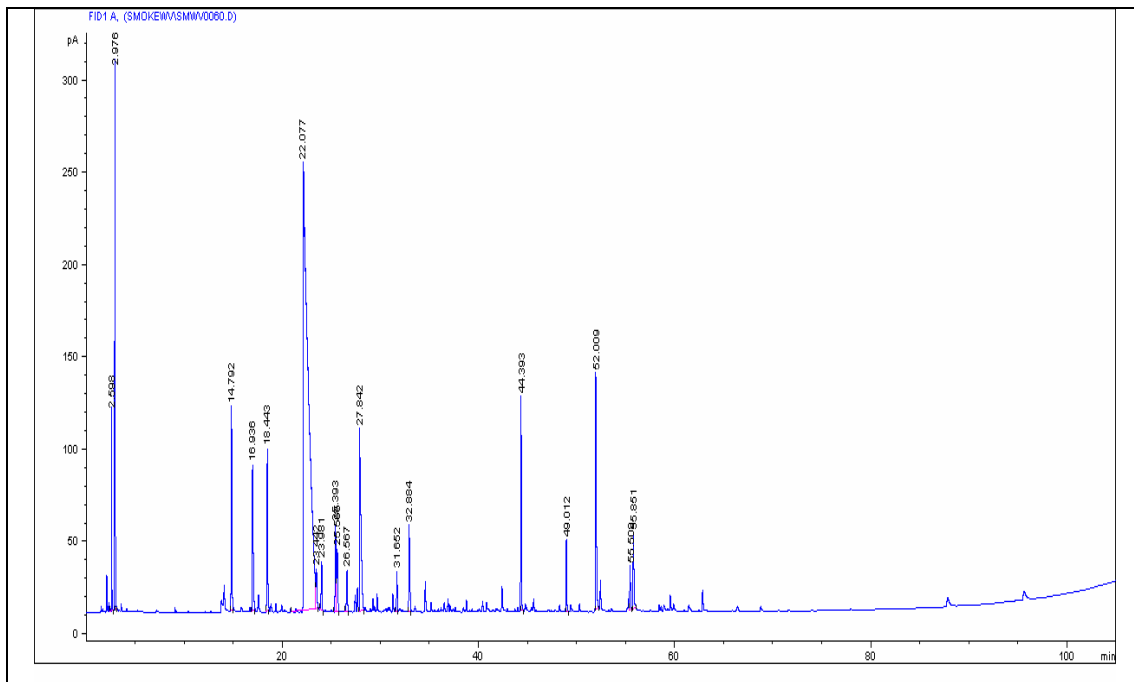


รูปที่ ข.10 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-2 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1

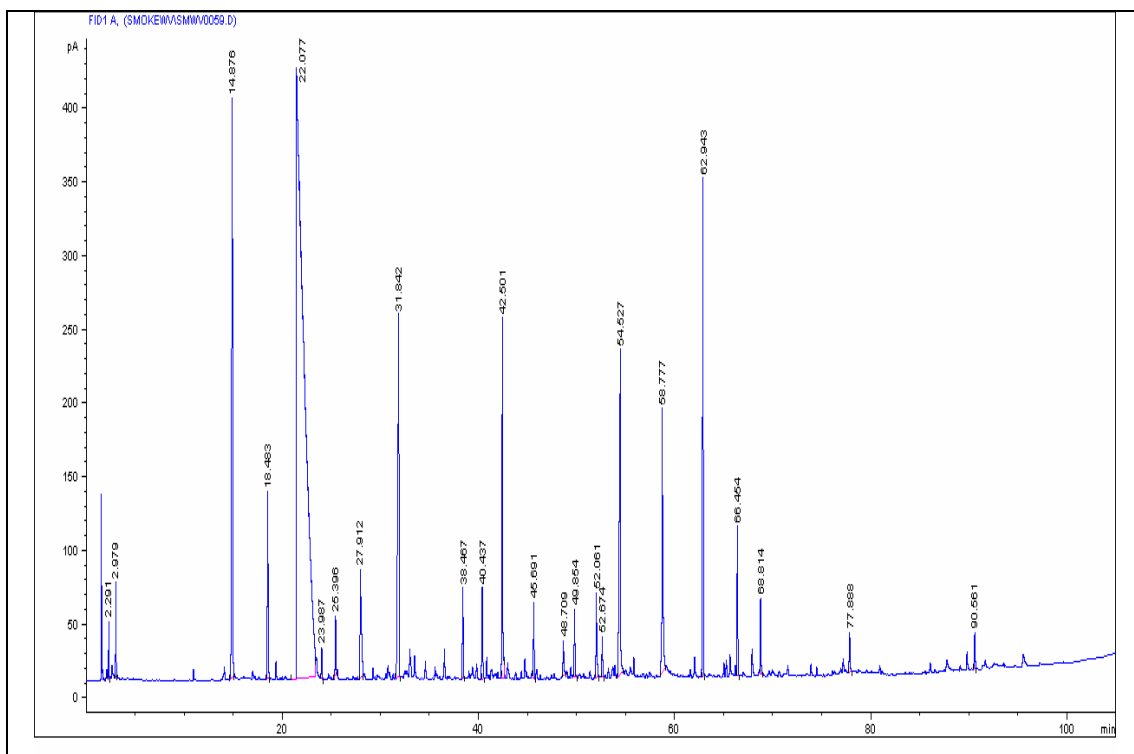


รูปที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-3 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1

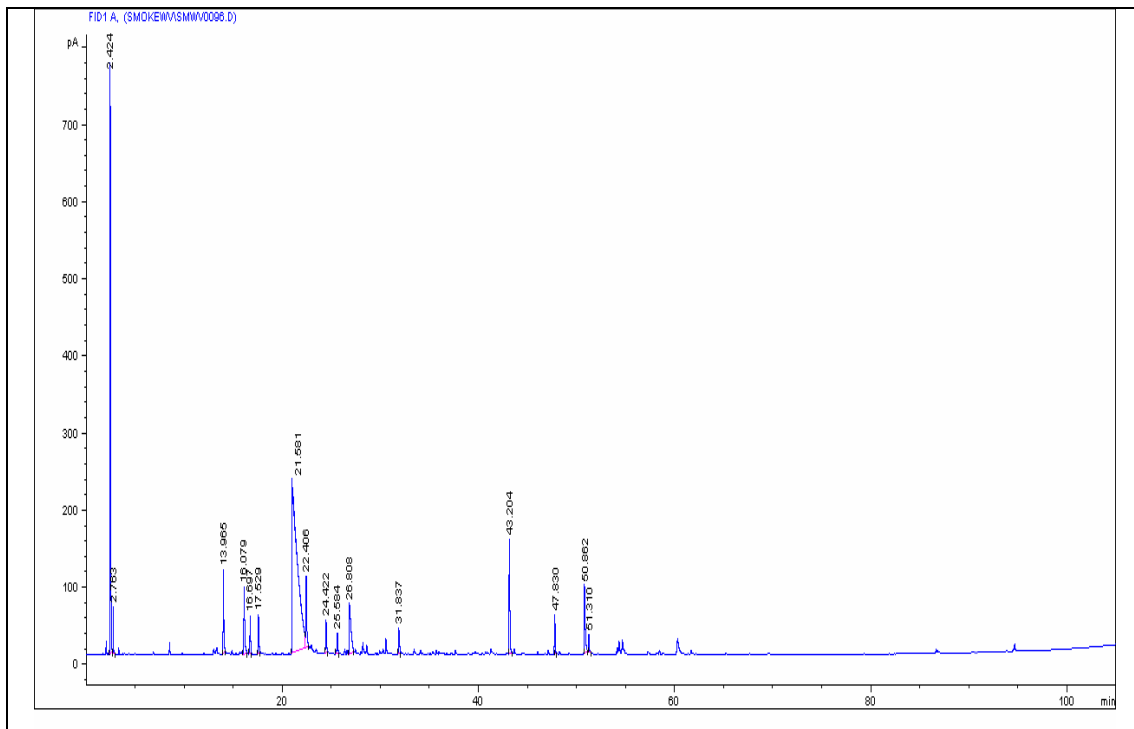




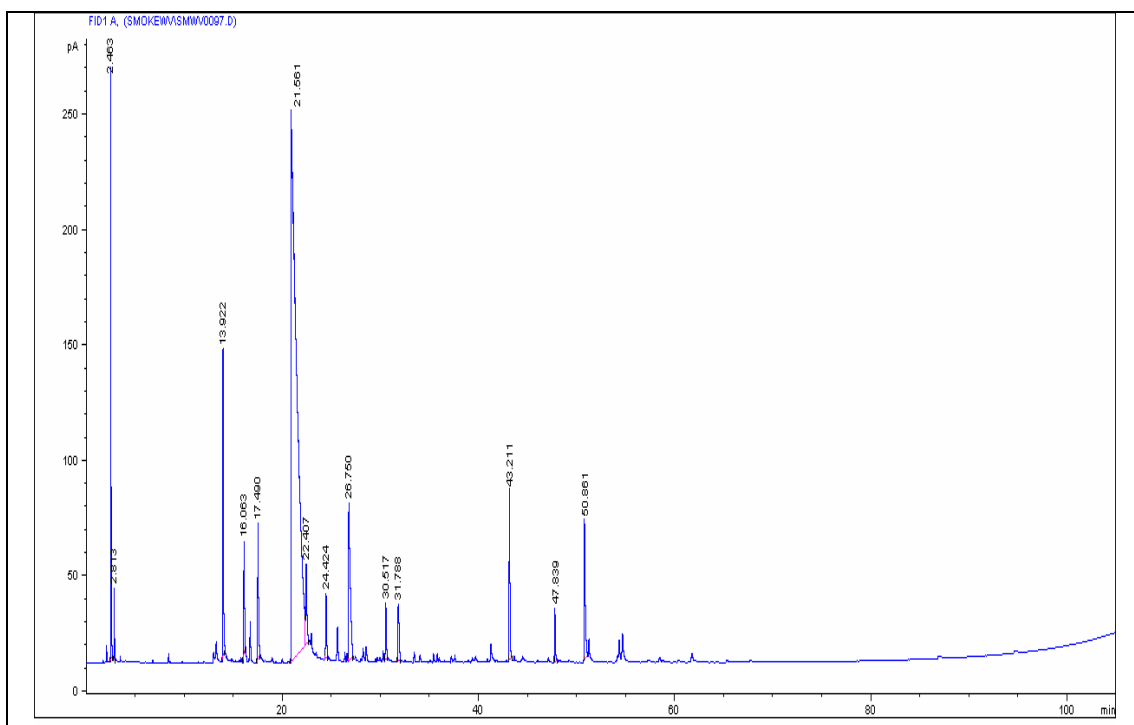
รูปที่ ข.13 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-2 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2



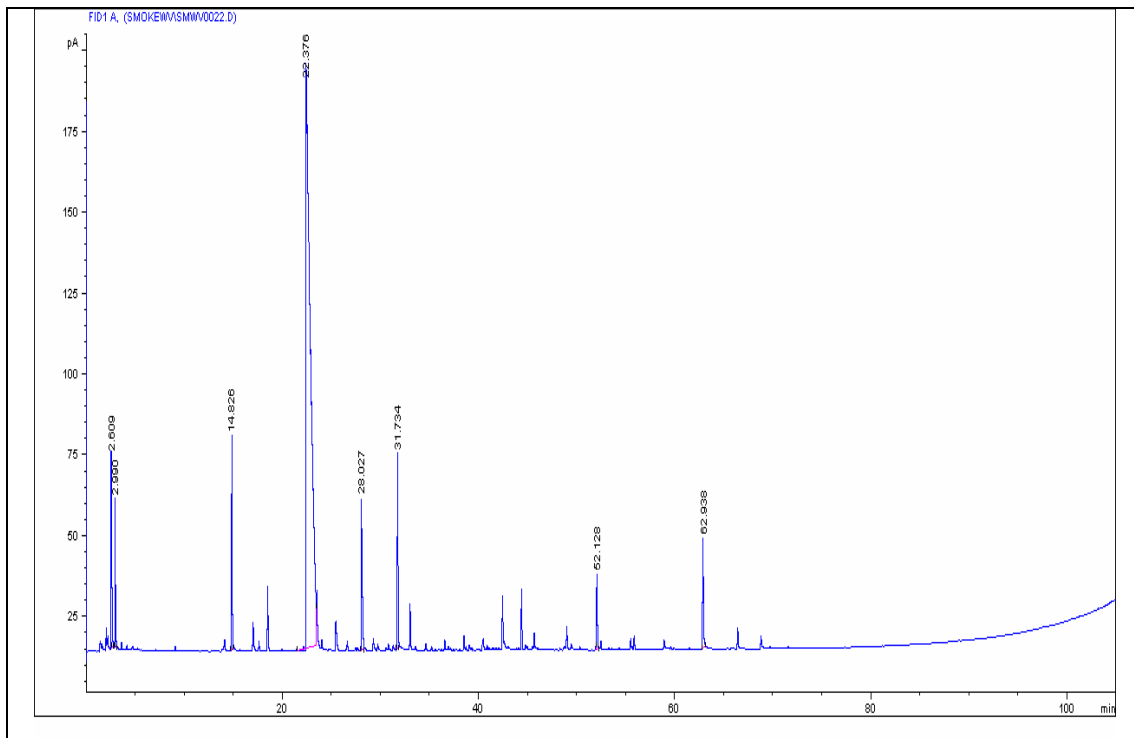
รูปที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-3 จากเครื่องกลั่น TBP โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-2



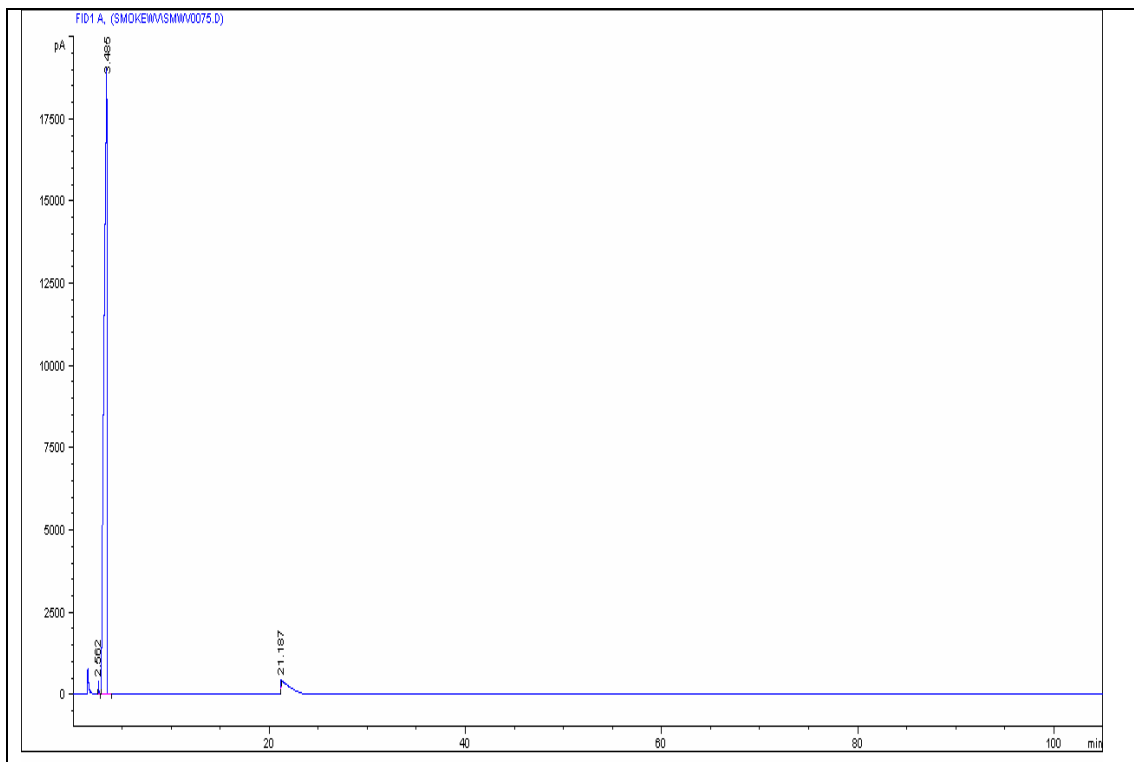
รูปที่ ข.15 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-1 จากเครื่องกลั่น Rotary Evaporator โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



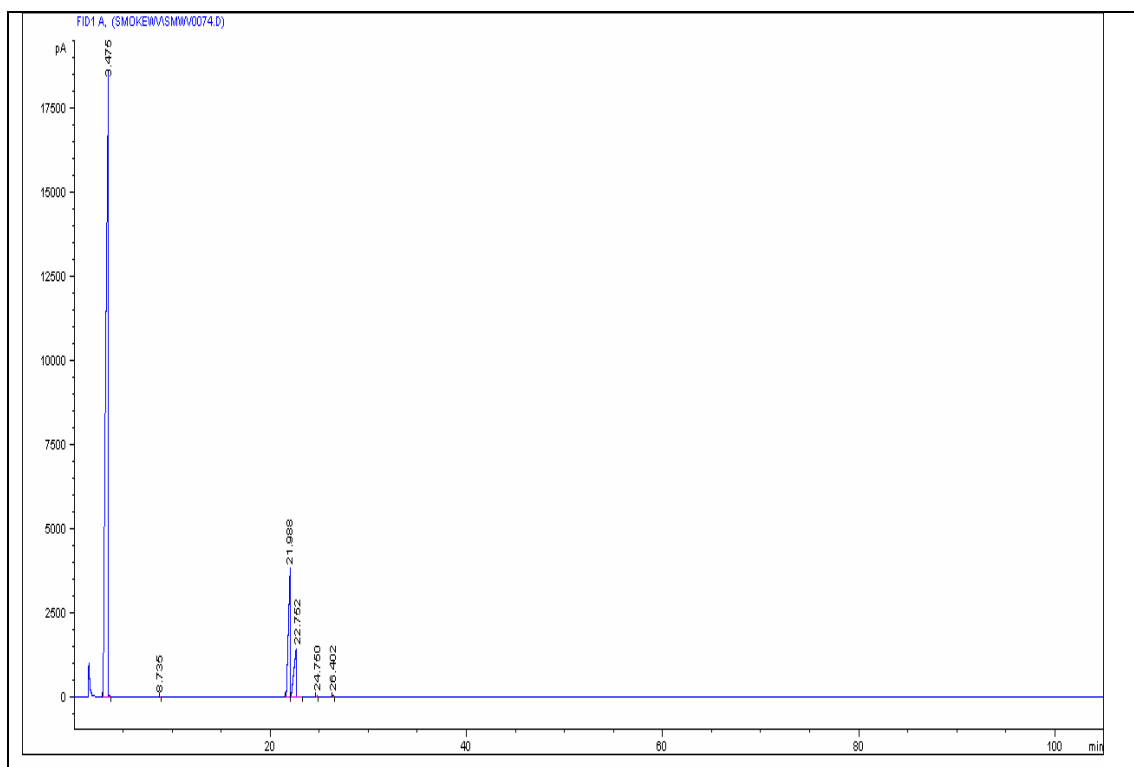
รูปที่ ข.16 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้แฟรคชัน DW-2 จากเครื่องกลั่น Rotary Evaporator โดยใช้สารป้อนเป็นแฟรคชัน RW-1



รูปที่ ข.17 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของน้ำส้มควันไม้กฤษณา



รูปที่ ข.18 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของสารมาตรฐานกรดอะซิติก



รูปที่ ข.19 ผลการวิเคราะห์ GC/FID ของสารมาตรฐาน 3-Furaldehyde