

การพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์-แก๊สเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัด ปริมาณสารระเหย

Enhancement Electronic-Gas Sensor for VOC's Analyze

สมชาย เปาะทองคำ

ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางด้านการประมวลผลสัญญาณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

p.somchai@thaiunique.com

จักรี ศรีนนท์ฉัตร

ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางด้านการประมวลผลสัญญาณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

jakkree.s@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์-แก๊สเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดปริมาณสารระเหย (VOC's) โดยประยุกต์ใช้กับเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สชนิดดีบุกออกไซด์ (SnO_2) เป็นเทคนิคใหม่ที่สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยชนิดต่างๆได้ โดยได้ทำการทดสอบกับสารระเหยในกลุ่มแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นต่างๆเพื่อสร้างเป็นกราฟมาตรฐาน ผลจากการทดลองพบว่า เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สชนิดดีบุกออกไซด์ทำการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ได้เป็นอย่างดี มีความเป็นเชิงเส้นดี โดยมีค่าความถูกต้องถึง 94% จึงเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดและวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยชนิดต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อมโดยใช้เทคนิคเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีต่อไป

คำหลัก : แก๊สโครมาโตกราฟี, เซ็นเซอร์แก๊ส, สารระเหย, จมูกอิเล็กทรอนิกส์

Abstract

This paper presents the enhancement electronic-gas sensor for volatile sample analyze by apply to the gas chromatography. SnO_2 gases sensor is the new technique for measure quality of volatile organic compounds (VOC)'s. The experimental results show that a relative standard calibration curve of methanol is almost linear and the gases sensor detector could be also measure quantity of volatile sample such as methanol. This sensor provides approximately 94% accuracy. This detector can be applied to measure the other volatile sample and other type of sample such as gas element sample.

Keywords: gas chromatography, gas sensor, VOC, electronic nose

1. บทนำ

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) เป็นเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ที่ใช้ในทางประกอบของสารประกอบต่างๆ โดยอาศัยหลักการแยกองค์ประกอบของสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปของแก๊ส ซึ่งเหมาะสมกับตัวอย่างที่เปลี่ยนสภาพเป็นไอได้ง่ายที่อุณหภูมิไม่สูงมาก จึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หามลพิษทางอากาศกลุ่มสารระเหย [1], [2], [3] ที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมเช่นจากอุบัติเหตุสารพิษรั่วไหลหรือมลพิษทางอากาศที่เกิดกับโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ทั้งต่อผู้ปฏิบัติงานเองและผู้อยู่อาศัยใกล้เคียง และก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในสิ่งมีชีวิตและในสิ่งแวดล้อมที่ยาวนานอีกด้วย การควบคุมและป้องกันจึงเป็นหน้าที่รับผิดชอบโดยตรงของโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องดูแลและป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าว การรั่วไหลของแก๊สที่เป็นพิษหรือไอของสารระเหย มีทั้งชนิดที่มีกลิ่นและไม่มีการตรวจสอบได้ยาก กลุ่มสารเคมีที่เป็นพวกสารระเหยสามารถใช้เซ็นเซอร์รับกลิ่นมาเป็นตัวตรวจวัดได้ [4], [5], [6] เนื่องจากเซ็นเซอร์รับกลิ่นบางเบอร์จะตอบสนองต่อไอของสารเคมีกลุ่มสารระเหยและไอของสารเคมีกลุ่มตัวทำละลายได้ดี จากคุณสมบัติข้อนี้เองจึงนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแบบใหม่ ที่มีราคาถูก ขนาดเล็ก มีความไวสูง และง่ายต่อการใช้งานเพื่อเป็นระบบตรวจวัดสารระเหยอันตรายในโรงงานอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. หลักการทำงาน

2.1 หลักการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

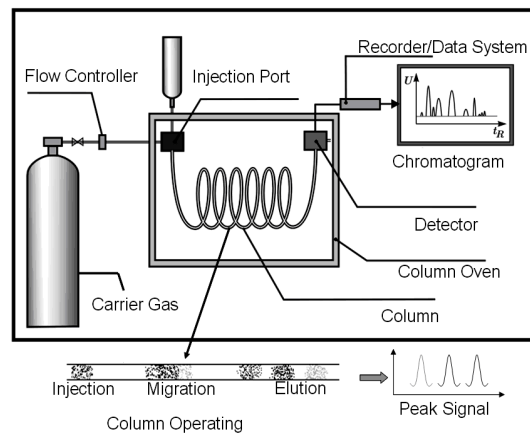
โครมาโตกราฟี

แก๊สโครมาโตกราฟี [7] เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ (Analytical Instrument) ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ มีระบบการทำงานดังรูปที่ 1 โดยอาศัยหลักการแยกองค์ประกอบของสารตัวอย่างในขณะที่สารตัวอย่างอยู่ในรูปของแก๊ส การแยกองค์ประกอบของสารที่กระจายอยู่ระหว่างเฟสที่ไม่ผสมกันสองเฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (Stationary Phase) และ เฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) องค์ประกอบของสารตัวอย่างซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างจากเฟสทั้งสองจะเคลื่อนที่ผ่านด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันจึงทำให้เกิดการแยกกัน สารแต่ละตัวจะถูกแก๊สพา (Carrier Gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่พาตัวอย่างผ่านเข้าไปจากตำแหน่งฉีดตัวอย่าง หรือ Injection Port ซึ่งตัวอย่างอาจจะอยู่ในรูปของแก๊ส หรือของเหลว ณ จุดนี้หากตัวอย่างเป็นของเหลวจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊ส จากนั้นตัวอย่างจะถูกแก๊สพา พาเข้าสู่ คอลัมน์ (Column) ภายในคอลัมน์จะบรรจุเฟสอยู่กับที่เอาไว้ องค์ประกอบของสารตัวอย่างซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างจากเฟสทั้งสองจะเคลื่อนที่ผ่านด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันจึงทำให้เกิดการแยกกัน กล่าวคือหากสารตัวใดมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าก็เดินทางได้เร็วกว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า และ สารตัวใดละลายอยู่ในเฟสคงที่ได้ดีกว่าก็จะเดินทางได้ช้ากว่าสารตัวที่ละลายในเฟสคงที่ได้ไม่ดี การแยกทำให้เราสามารถวิเคราะห์ในเชิงคุณสมบัติ (Quality) ได้ เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกโดยคอลัมน์ถูกแก๊สพามาจนถึงปลายทางก็จะโดนตรวจวัดโดยตัวตรวจวัด (Detector) เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวอย่างนั้นๆ จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ (Quantity) ได้ โดยสัญญาณไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดจะถูกบันทึกเป็นโครมาโตแกรม ลงในส่วนบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูล

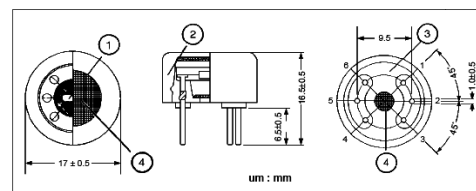
2.2 หลักการทำงานของเซ็นเซอร์แก๊ส

เซ็นเซอร์แก๊สที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดมีโครงสร้างดังรูปที่ 2 ตัวตรวจวัดแก๊สสร้างจากออกไซด์ของโลหะดีบุก (SnO_2) [8]

เมื่อผลึกออกไซด์ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของออกซิเจนจะไปเกาะตัวที่ผิวของผลึกออกไซด์โลหะด้วยประจุที่เป็นลบ (Negative charge) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวและประจุบวกอยู่ภายนอกตั้งแสดงแบบจำลองและสมการทางเคมีในรูปที่ 3(A) โมเลกุลของออกซิเจนสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างผลึกออกไซด์โลหะซึ่งกีดขวางการไหลของอิเล็กตรอน จึงทำให้ความต้านทานของเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น เมื่อมีตัวอย่างที่ต้องการวัดผ่านเข้ามาเช่นเมทานอล (Methanol) ซึ่งเป็นแก๊สที่ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง หรือทำให้เกิดการ Deoxidizing ขึ้นทำให้เกิดการดึงออกซิเจนออกจากผิวของผลึกออกไซด์โลหะ ทำให้ความหนาแน่นประจุลบที่ผิวผลึกออกไซด์โลหะลดลง และทำให้ศักย์ไฟฟ้าซึ่งขวางการไหลของอิเล็กตรอนลดลงด้วย เป็นผลให้ความต้านทานของเซ็นเซอร์ลดลงดังแสดงในรูปที่ 3(B) เมื่อแก๊สที่มีส่วนของตัวอย่างที่ทำให้เกิด Deoxidizing ผ่านไปด้วยการไล่ด้วยอากาศก็จะทำให้โมเลกุลของออกซิเจนจะไปเกาะตัวที่ผิวของผลึกออกไซด์โลหะใหม่ เป็นผลให้ความต้านทานของเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้นกลับสู่ค่าเดิม

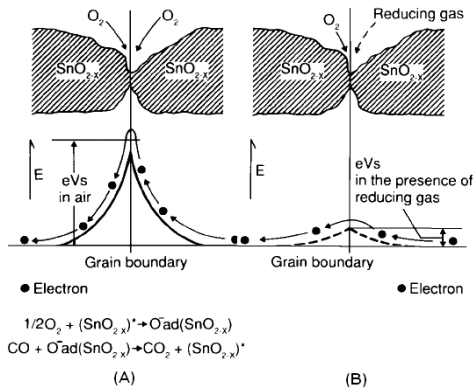


รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี



- ① Sensing Element:
SnO₂ is sintered to form a thick film on the surface of an alumina ceramic tube which contains an internal heater.
- ② Cap: Nylon 66
- ③ Sensor Base: Nylon 66
- ④ Flame Arrestor: 100 mesh SUS 316 double gauze

รูปที่ 2 โครงสร้างของเซ็นเซอร์แก๊ส



รูปที่ 3 (A) แบบจำลองอธิบายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอ็อกไซด์โลหะ

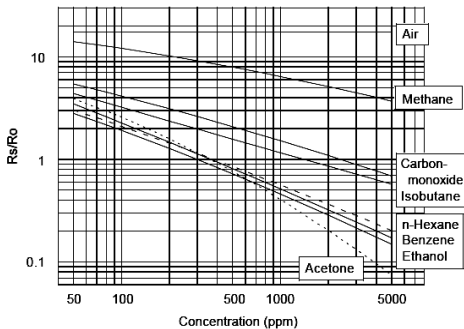
(B) แบบจำลองอธิบายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอ็อกไซด์โลหะขณะทำการวัดแก๊ส

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซ็นเซอร์และความเข้มข้นของ Deoxidizing gas แสดงดังสมการที่ 1

$$R_s = A[C]^{-\alpha} \quad (1)$$

โดยที่ R_s คือค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ A คือค่าคงที่ $[C]$ คือค่าความเข้มข้นของแก๊ส และ α คือความชันของกราฟความต้านทาน

ความไวต่อความเข้มข้นของแก๊สสามารถอธิบายด้วยอัตราส่วน ของความต้านทานของเซ็นเซอร์ขณะที่มีแก๊สเป้าหมาย (R_s) ต่อความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่อยู่ในอากาศ (R_o) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซ็นเซอร์ต่อปริมาณของแก๊ส

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวตรวจวัด

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี เริ่มต้นผู้ใช้ต้องทำการนำสารมาตรฐาน (Standard) ที่ทราบค่าที่แน่ชัดค่าต่างๆมาทำการฉีดเข้าเครื่องแล้วทำกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้น

(Linear) ดังสมการที่ 2 และสามารถหาค่าของปริมาณสารได้ตามสมการที่ 3

$$y = mx + b \quad (2)$$

$$x = \frac{y - b}{m} \quad (3)$$

โดยที่ y คือพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านได้

m คือความชัน

x คือเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างที่วัด

b คือจุดตัดแกน y

ค่า m และ b สามารถหาได้จากสมการที่ 4 และ 5 [1], [9],

[10] ตามลำดับ

$$m = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4)$$

$$b = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5)$$

โดยที่ n คือจำนวนของข้อมูล

ค่าที่แสดงระดับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของตัวอย่างกับพื้นที่ใต้กราฟของกราฟมาตรฐานที่อ่านได้คือค่า สหสัมพันธ์ [11], [12], [13] (Correlation Coefficient) หรือค่า r สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination) หรือค่า R^2 กราฟมาตรฐานที่ได้จากการวัดสารมาตรฐาน จะมีสอดคล้องกับปริมาณสารที่อ่านค่าได้หรือไม่สามารถคำนวณจากค่า R^2 จากสมการที่ 7 โดยที่ค่า R^2 ที่ดีต้องมีค่าเข้าใกล้ 1 [7]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right)}} \quad (6)$$

ดังนั้น

$$R^2 = r^2 \quad (7)$$

โดยที่ r คือ สหสัมพันธ์ ค่า R^2 คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เมื่อ \bar{x} คือค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ของสารที่วัดและ \bar{y} คือ

ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

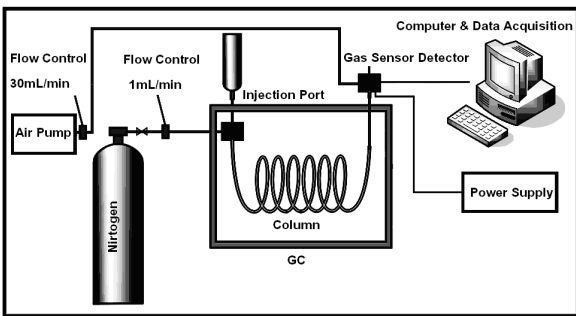
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (9)$$

3. การทดลอง

ประกอบชุดทดลองดังรูปที่ 5 ใช้คอลัมน์ ชนิด CP-SIL 5 ความยาว 15 m เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25mm ความหนาฟิล์ม 0.25 μm ติดตั้งเข้ากับ Injection Port แบบ On Column ปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนซึ่งคือแก๊สพาที่ 1 mL/min ปลายอีกด้านของคอลัมน์ต่อเข้ากับ เซ็นเซอร์แก๊ส และปรับอัตราการไหลของแก๊สอากาศ ให้กับเซ็นเซอร์แก๊สที่ 30mL/min ตั้งค่าอุณหภูมิของ Injection Port 150°C และของตู้คอลัมน์ 40°C นาน 15 นาที ใช้ Data acquisition ของ Varian รุ่น ACDC Board ร่วมกับ Software Star Workstation เป็นตัวเก็บข้อมูล

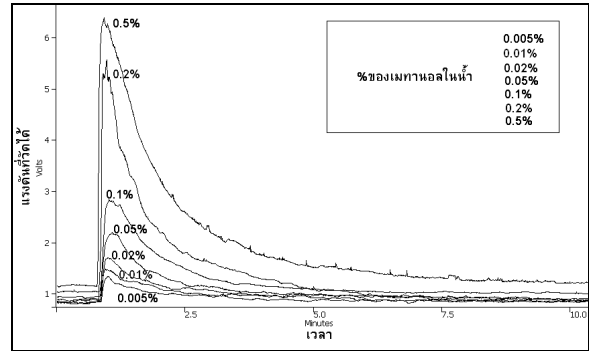
เตรียมสารมาตรฐานโดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้น Concentration: C) 0.005%, 0.01%, 0.02%, 0.05%, 0.1%, 0.2% และ 0.5% ในน้ำกลั่นขนาด 1mL จากนั้นฉีดสารมาตรฐานเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีปริมาณ 1.0 μL ที่ความเข้มข้นแต่ละระดับ ระดับละหนึ่งครั้งเพื่อวิเคราะห์หาสมการเส้นตรง และสร้างกราฟมาตรฐาน คำนวณหาค่า R^2 แล้วทำการเตรียมตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 0.04%, 0.05%, 0.07%, 0.13% และ 0.20% จากนั้นทดลองฉีดตัวอย่างที่ความเข้มข้นแต่ละระดับ ระดับละหนึ่งครั้งเพื่อทดสอบการทำงานจริงของตัวตรวจวัดอีกครั้ง



รูปที่ 5 โครงสร้างของชุดทดลอง

4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองได้ค่าเวลาพิก (Retention Time: RT) ค่าความสูงของแรงดันที่วัดได้ (Peak Hight: H) และพื้นที่ใต้กราฟ (Area Count) ของเมทานอลแต่ละระดับดังแสดงในตารางที่ 1 และลักษณะของโครมาโตแกรมดังรูปที่ 6



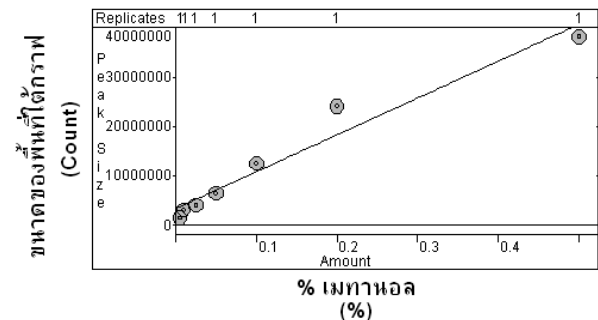
รูปที่ 6 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากผลการทดลองอ่านค่าพื้นที่ใต้กราฟ ค่าความสูงของกราฟ และเวลาที่เกิดความสูงยอดของสัญญาณ หรือ (Peak) แสดงค่าของผลการวัดสารมาตรฐานดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลของการวัดสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ

| X_i (%) | RT (Min) | H (mV) | $Area$ (Count) |
|--------------|---------------|-------------|-------------------|
| 0.005 | 1.061 | 426.60 | 1483414 |
| 0.010 | 1.051 | 553.48 | 2568842 |
| 0.020 | 1.073 | 774.18 | 4086912 |
| 0.050 | 1.111 | 1204.58 | 5575904 |
| 0.100 | 1.114 | 1730.07 | 10568587 |
| 0.200 | 0.989 | 4254.25 | 21315380 |
| 0.500 | 1.010 | 5043.96 | 38171328 |

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำกราฟมาตรฐานได้กราฟมาตรฐานแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟมาตรฐานแบบเชิงเส้นของสารมาตรฐานทั้งหมด

สมการของกราฟมาตรฐานและค่า R^2 ของกราฟมาตรฐาน ในรูปที่ 7 ได้เท่ากับสมการที่ 10 และสมการที่ 11 ตามลำดับ

$$y = 7.4537 e + 07 x + 2.490 e + 06 \quad (10)$$

และ

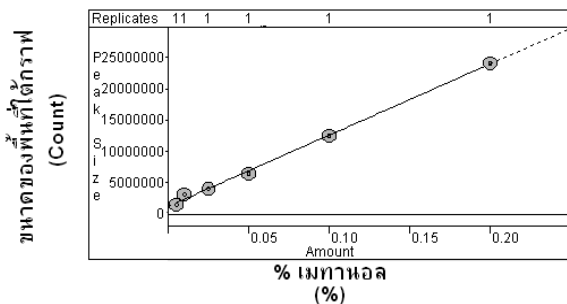
$$R^2 = 0.980422 \quad (11)$$

เมื่อใช้สมการที่ 10 ทดสอบวัดค่าที่ได้จากการฉีดทดสอบอ่านค่าได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลของการวัดสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆจากกราฟมาตรฐานสมการที่ 10

| X_i (%) | Area (Count) | C (%) | Error (%) |
|--------------|-----------------|----------|--------------|
| 0.04 | 5367350 | 0.0386 | 3.50 |
| 0.05 | 6367130 | 0.0520 | 4.00 |
| 0.07 | 8199189 | 0.0766 | 9.43 |
| 0.13 | 13485552 | 0.1475 | 13.46 |
| 0.20 | 21315380 | 0.2526 | 26.30 |

ค่า $R^2 < 0.995$ เป็นเหตุให้ค่าความผิดพลาดในการวัดตัวอย่างจริงค่อนข้างสูง เช่นที่ความเข้มข้นจริง 0.20 วัดค่าได้ 0.2526 และมีค่าผิดพลาด 26.3% ดังนั้นเมื่อได้กราฟมาตรฐานพิจารณาพบว่าช่วงความเข้มข้นสูงเริ่มไม่เป็นเชิงเส้น จึงตัดจุด 0.5% ออกได้ กราฟมาตรฐานแบบเชิงเส้นใหม่ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟมาตรฐานแบบเชิงเส้นที่ได้เมื่อตัดจุดวัดช่วงไม่เป็นเชิงเส้นออก

สมการของกราฟมาตรฐานและค่า R^2 ของตัวตรวจวัดแบบใหม่ช่วงที่เป็นเชิงเส้นของกราฟมาตรฐานในรูปที่ 8 ได้เท่ากับสมการที่ 12 และสมการที่ 13 ตามลำดับ

$$y = 9.9286 e + 07 x + 1.1463 e + 06 \quad (12)$$

และ

$$R^2 = 0.996162 \quad (13)$$

เมื่อใช้สมการที่ 12 วัดค่าที่ได้จากการฉีดตัวอย่างทดสอบอ่านค่าได้ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลของการวัดสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆจากกราฟมาตรฐานสมการที่ 12

| X_i (%) | Area (Count) | C (%) | Error (%) |
|--------------|-----------------|----------|--------------|
| 0.04 | 5367350 | 0.0425 | 6.25 |
| 0.05 | 6367130 | 0.0526 | 5.20 |
| 0.07 | 8199189 | 0.0710 | 1.43 |
| 0.13 | 13485552 | 0.1243 | 4.38 |
| 0.20 | 21315380 | 0.2031 | 1.55 |

5. สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์แก๊สชนิดดีบุกออกไซด์เป็นตัวตรวจวัดโดยทำงานร่วมกับเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่นำเสนอบนบทความนี้ สามารถวัดปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยชนิดของเมทานอลได้ในช่วง 0.005%-0.5% มีสมการของกราฟมาตรฐานเป็น

$$y = 7.4537 e + 07 x + 2.490 e + 06$$

และค่า R^2 ของกราฟมาตรฐานคือ $R^2 = 0.980422$

เมื่อวัดตัวอย่างจริงที่ความเข้มข้นมีค่าความผิดพลาดในการวัดอยู่ในช่วง 3.50%-26.30% เมื่อพิจารณาพบว่าช่วงความเข้มข้นสูงเริ่มไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้การวัดช่วงความเข้มข้นสูงมีค่าความผิดพลาดสูงขึ้น เมื่อลดช่วงในการวัดลงเป็น 0.005%-0.2% กราฟมาตรฐานและค่า R^2 ของตัวตรวจวัดแบบใหม่มีสมการของกราฟมาตรฐานเป็น

$$y = 9.9286 e + 07 x + 1.1463 e + 06$$

และค่า $R^2 = 0.996162$ เมื่อวัดตัวอย่างในช่วงความเข้มข้นพบว่ามีความผิดพลาดน้อยลงอยู่ในช่วง 1.43% - 6.25% ดังนั้นสามารถนำเทคนิคใหม่นี้มาใช้ในการตรวจวัดปริมาณสารระเหยได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทไทยยูนิค จำกัด ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fang Xiangsheng, Qi Guowei, Guo Miao, Pan Min and Chen Yuquan.2005. An Improved Integrated Electronic Nose for Online Measurement of VOCs in Indoor Air. Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, Changhai, China, Sep 1-4, 2005: 2894-2897
- [2] J.W. Gardner and J.E. Taylor. Novel Convolution Based Signal Processing Techniques for A Simplified artificial Factory Mucosa. The 14th International Conference On Solid-State Sensor Actuator and Microsystems, Lyon, France, June 10-14, 2007: 2473-2476
- [3] Hanseup Kim, William H. Steinecker, Shaelah Reidy, Gordon R. Lambertus, Aaron A. Astle Khalil Najafi, Edward T. Zellers, Luis P. Bernal, Peter D. Washabaugh, and Kensall D. Wise. A Micropump-Driven High-Speed MEMS Gas Chromatography System. The 14th International Conference On Solid-State Sensor Actuator and Microsystems, Lyon, France, June 10-14, 2007: 1505-1508
- [4] F.K. Che Harun, P.H. King, J.A. Covington and J.W. Gardner. 2007. Novel gas chromatographic micro system with very large sensor arrays for advanced odour discrimination. IEEE SENSORS 2007 Conference, May,2007: 1361-1363
- [5] Jesús Lozano, José Pedro Santos, Javier Gutiérrez and M Carmen Horrillo.2005. Comparison among several fiber coating for a solid phase microextraction (SPME) based electronic nose applied to wine discrimination. IEEE. 2005:1339-1342
- [6] Xing CHEN, Mingfu CAO, Yan Hao, Yi LI and Ping WANG.2005. A Non-invasive Detection of Lung Cancer Combined Virtual Gas Sensors Array with Imaging Recognition Technique. Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, Changhai, China, Sep 1-4, 2005:5873-5876
- [7] James W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell. 1993. Instrumentation for Engineering Measurements , John Wiley & Sons, Inc, United States of America.
- [8] ธิติพงษ์ วงสาโท, วีรพงษ์ โชคชัย และ มงคล ปุษยตานนท์ . 2551. ระบบประเมินอายุของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, นครนายก, ประเทศไทย, 29-31 ตุลาคม 2551: 1333-1336.
- [9] ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภาคย์. 2551. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 215-222.
- [10] Douglas A. Skoog ,F.James Holler, and Stanley R. Crouch. 2007. Principle of Instrumental Analysis, Thomson Brooks/Cole, Canada.
- [11] วัฒนา สุนทรชัย.2546. เรียนสถิติด้วย SSPS ภาคสถิติเชิงพารามิเตอร์. วิทยพัฒน์, กรุงเทพฯ, หน้า 187-188
- [12] Juliano S. Gonschorowski, Walter J. Salcedo, Germa C. S. Quispe, Francisco J. R. Fernandez and Nathalia Peixoto.2007. Fractal Brownian motion for feature extraction in noisy signals from gas sensors. IEEE SENSORS 2007 Conference, May,2007: 312-315
- [13] Banchar Charumporn, Toru Fujinaka, Michifumi Yoshioka, and Sigeru Omatu. 2006. Compact Electronic Nose Systems Using Metal Oxide Gas Sensors for Fire Detection Systems. IJC on Neural Networks, Vancouver, BC, Canada July 16-21, 2006: 2214-2217