บทที่ 2

ทฤษฎี

ตัวตรวจสอบการรั่วของแก๊สเป็นตัวตรวจสอบประเภทหนึ่งซึ่งออกแบบให้ตรวจสอบความเข้มข้นของแก๊สในระดับที่เริ่มจะเป็นอันตราย ทั้งแก๊สติดไฟ และแก๊สพิษ โดยทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า อาทิ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความต้านทานของ Sensing Element เมื่ออยู่ในบรรยากาศของแก๊สนั้น ๆ และแสดงเป็นสัญญาณเตือนในลักษณะต่าง ๆ อาทิ สัญญาณแสง สัญญาณเสียง เพื่อเตือนให้มีการจัดการในด้านความปลอดภัย โดยระดับความปลอดภัยของแก๊สติดไฟจะระบุในหน่วยของ LEL (Lower Explosive Limit) หรือ UEL (Upper Explosive Limit) ซึ่งหมายถึงระดับพิกัดล่างหรือพิกัดบนของความเข้มข้นแก๊สที่สามารถติดไฟได้เมื่อมีประกายไฟ หรือสะเก็ดไฟก็ตาม สำหรับแก๊สพิษจะระบุความปลอดภัยในหน่วย TLV (Threshode Limit Value) ซึ่งเป็นความเข้มข้นมากที่สุดของแก๊สพิษที่บุคลากรที่อยู่ในบรรยากาศดังกล่าวสามารถปฏิบัติงานต่อเนื่องได้อย่างปลอดภัย ภายในเวลา 8 ชั่วโมง

2.1 ชนิดของตัวตรวจสอบแก๊ส

การจำแนกประเภทของตัวตรวจสอบแก๊สจะขึ้นกับสมบัติในการจำแนก แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะประเภทที่นิยมใช้อย่างกว้างในการตรวจวัดการรั่วของแก๊ส คือ

2.1.1 Semiconductor type เป็นการตรวจสอบโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมี – ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับความร้อนและอยู่ในบรรยากาศของแก๊ส ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามความดันย่อย หรือความเข้มข้นของแก๊ส สำหรับวัสดุกึ่งตัวนำที่เป็นสารเซรามิกส์และนิยมใช้เป็นตัวตรวจสอบแก๊สคือ SnO_2

2.1.2 Contact combustion type เป็นการตรวจสอบโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของขดลวด อาทิ ทองคำขาว ที่มีสารตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่ ซึ่งเมื่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกริยาแก๊สเป็นผลให้ความร้อนของขดลวดจะสูงขึ้น ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแก๊ส ซึ่งตัวตรวจสอบแก๊สรั่วแบบนี้อาจเรียกได้อีกแบบหนึ่งว่า Catalytic Combusion sensor

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อใช้ตัวตรวจสอบแก๊สแต่ละประเภทคือ ลักษณะของการนำตัวตรวจสอบแก๊สไปใช้งาน เนื่องจากความต้องการคุณสมบัติจะแตกต่างกัน อาทิ ในตัวตรวจสอบแก๊สซึ่งใช้เป็นตัวตรวจสอบการรั่วของแก๊สนั้นจะต้องมีความคงที่ (Stability) มากกว่าความแม่นยำ แต่ตัวตรวจสอบที่ใช้เป็นเครื่องมือตรวจวัดระดับความเข้มข้นต้องการค่าความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) มากกว่าความคงที่ ซึ่งในบรรดาตัวตรวจสอบแก๊สที่ได้กล่าวมาแล้ว พวก Semiconductor sensor จัดได้ว่ามีสมบัติความคงที่

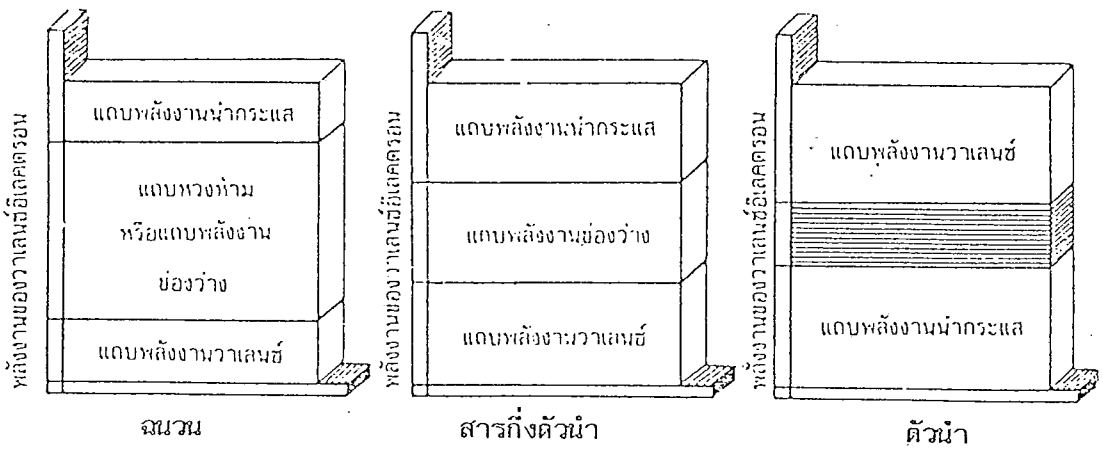
เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจสอบประเภทอื่น ๆ อาทิ Catalytic combusion sensor ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จะเน้นเกี่ยวกับพวก Semiconductor sensor เป็นหลัก

2.2 กลไกการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าในตัวตรวจสอบชนิด Semiconductor Type และ Combustion Type

2.2.1 กลไกการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของตัวตรวจสอบแก๊สชนิด Semiconductor type

2.2.1.1 วัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor material)

สารกึ่งตัวนำเป็นเซรามิกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนและต่ำกว่าตัวนำ โครงสร้างของแถบพลังงานประกอบด้วยแถบเวเลนต์เต็มและแถบการนำว่าง มีช่องว่างของพลังงานความกว้างไม่เกิน 4 อิเล็กตรอนโวลต์ กั้นระหว่าง 2 แถบนี้ ดังนั้นถ้าอิเล็คตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนต์ได้รับพลังงานมากพอก็สามารถข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบนำและก่อให้เกิดการนำได้ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แสดงแถบพลังในสารชนิดต่าง ๆ

สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดในตัวและสารกึ่งตัวนำเจือปน ซึ่งความแตกต่างของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด ขึ้นกับการเกิดของสภาพการนำไฟฟ้า โดยที่ในสารกึ่งตัวนำในตัวความนำไฟฟ้าเป็นสมบัติที่อยู่ในตัวเอง เนื่องจากในแถบเวเลนต์มีอิเล็กตรอนบรรจุเต็มทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็คตรอจจำกัด จนเสมือนถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่เนื่องจากช่องว่างพลังงานในสารกึ่งตัวนำมีความกว้างไม่มากนักทำให้ไม่จำเป็นต้องให้พลังงานสูงแก่อิเล็กตรอน อาทิ ใน ซิลิคอน ซึ่งมีอิเล็กตรอนเวเลนซ์ 4 ตัว มีช่องว่างพลังงานกว้าง 1.1 อิเล็กตรอนโวลต์ที่ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งพลังงานที่ระดับอุณหภูมิห้องก็เพียงพอที่กระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนต์เข้าไปอยู่ในแถบนำ และให้เกิดการนำไฟฟ้านอกจากอิเล็กตรอนแล้ว หลุม (Hole) ในแถบเวเลนต์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายของ อิเล็กตรอน ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ ตัวอย่างของวัสดุประเภทนี้ได้แก่ Si, Ge ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นธาตุในหมู่ 4 A

ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดสารเจือปนนั้น ความนำไฟฟ้าเกิดจากการเติมสารเจือปนลงในอะตอมทำให้เกิดสารละลายของแข็งแบบแทนที่และกลายเป็นสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสารเจือปนที่เติมลงไปจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหรือหลุมขึ้นมาในแลตทิชก่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ ในสารกึ่งตัวนำประเภทนี้สามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำในตัวชนิดเอ็น (N-Type Impurity Smiconductor) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Impurity Semiconductior) โดยพวกสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นพาหะที่ทำหน้าที่นำประจุจะเป็นพวกอิเล็กตรอนที่ได้เพิ่มมาจากสารเจือปน อาทิ การเติม P ซึ่งมีเวเลนต์อิเล็กตรอน 5 ตัว ลงในซิลิกอนที่มีอิเล็กตรอน 4 ตัว ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระของ P ที่ดูดยึดอย่างหลวม ๆ กับนิวเคลียสด้วยพลังงานเพียง 0.044 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการที่ช่องว่างพลังงานของซิลิคอนเท่ากับ 1.1 อิเล็ตรอนโวลต์ ดังนั้นอิเล็กตรอนของ Pต้องการพลังงานเพียง 0.044 อิเล็กตรอนโวลต์ ก็สามารถเข้าไปในแถบนำ และนำไฟฟ้าได้เมื่อสารตัวนำอยู่ในสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเรียกสารเจือปนประเภทนี้ว่าตัวให้ (Donor) และจะมีระดับพลังงานอยู่ต่ำกว่าแถบการนำ หรือส่วนบนของช่องว่างพลังงานเรียกว่าระดับตัวให้ (Donor Level) สำหรับสารเจือปนในกลุ่มนี้จะอยู่ในหมู่ 5A เป็นส่วนใหญ่นอกจาก P แล้วได้แก่ N As และ Sb

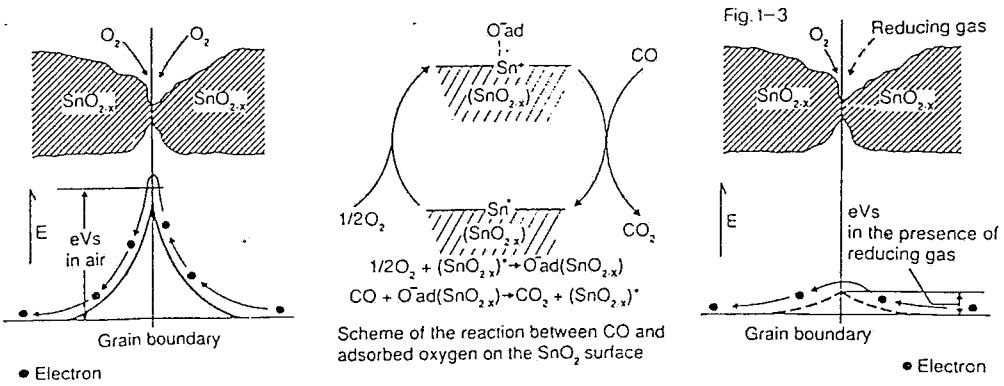
สำหรับพวกสารกึ่งตัวนำชนิดมีพาหะที่ทำหน้าที่นำประจุเป็นพวกหลุมหรือประจุบวก ซึ่งได้จากการเติมสารเจือปนในธาตุหมู่ 3 A คือ B Al Ga และ In ซึ่งมีเวเลนต์อิเล็กตรอน 3 ตัว ลงไปในอะตอมของธาตุหมู่ 4A เช่น Si Ge Sn ซึ่งมีเวเลนต์อิเล็กตรอน 4 ตัว ดังนั้นจึงมีหลุมเหลือ 1 หลุมในสารเจือปนเสมอ และพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอน จึงเรียกว่าสารเจือปนเหล่านี้ว่าตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ซึ่งมีระดับพลังงานเหนือแถบเวเลนต์เล็กน้อยเรียกว่าระดับตัวรับ (Acceptor Level) ซึ่งอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนต์สามารถเข้าไปอยู่ได้ เนื่องจากจะใช้พลังงานต่ำกว่าการเข้าไปอยู่ในแถบนำ ดังนั้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนออกไปจากเวเลนต์แล้วจะทำให้เกิดหลุมที่สภาพเคลื่อนที่ได้ จึงมีการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ในการใช้งานด้านตรวจสอบแก๊ส โดยมักใช้วัสดุกึ่งตัวนำประเภทเอ็นเป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำที่มีการใช้ทางด้านนี้ได้แก่ Al_2O_3 SnO_2 Sintered Cao-SnO_2 เป็นต้น แต่ที่นิยมแพร่หลายทั่วไป คือ SnO_2

2.2.1.2 กลไกการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าของ SnO_2

SnO_2 มีโครงสร้างแบบ Rutile เป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิด n-type ที่มีความกว้างของช่องว่างพลังงานประมาณ 3.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งในสภาพอุณหภูมิห้องจะมีความเป็นฉนวนสูง และการนำไฟฟ้าเป็นผลมาจากการเกิดจุดบกพร่องของโครงสร้างทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจนโดยที่ใต้แถบนำ (Conduction Band) จะเกิดระดับตัวให้ (Donor Level) ซึ่งมีค่าพลังงาน 0.03-0.034 หรือ 0.14-0.15 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นกับชนิดช่องว่างออกซิเจนเป็นชนิดเดี่ยว (Single Vancacy) หรือชนิดคู่ (Double Vacancies) จากการเคลื่อนที่ของออกซิเจนจากบริเวณปลายสุดของโครงสร้าง Rutile (The Terminal Layer of Rutile) เมื่อได้รับความร้อน

ในสภาพที่ได้รับความร้อน SnO_2 เมื่ออยู่ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนจะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งได้จากการแตกตัวในระดับของผู้ให้ผ่านแถบนำไปยังเกรนต่าง ๆ โดยอิเล็กตรอนสามารถที่จะไหลได้อย่างอิสระ แต่เมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนจะมีปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนที่อยู่ระหว่างพื้นผิวของ SnO_2 กับบรรยากาศกับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกออกซิเจนดึงดูดไปยังพื้นผิวด้วยสมบัติ Electro Affinity ของออกซิเจนกลายเป็นออกซิเจนอิออน O^- หรือ O^{2-} ขึ้นกับอุณหภูมิเกาะติดที่พื้นผิวของ SnO_2 เป็นผลให้เกิดกำแพงศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างเกรนเพราะในระดับผู้ให้เกิดมีสภาพการพร่องพาหะนำประจุ และกลายเป็นไฟฟ้าบวก ผลการเกิดกำแพงศักย์ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนถูกจำกัด ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงต่ำลงในบรรยากาศออกซิเจน แต่ในขณะที่เกิดประจุพื้นผิวการดูดซับออกซิเจนต่อไปก็มีอัตราที่ช้าลง เพราะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะต้องข้ามพื้นผิวขวางกั้นซึ่งเป็นชั้นประจุของพื้นผิวที่เกิดก่อน นอกจากนี้จุดอิ่มตัวของพื้นผิว SnO_2 ก็ต่ำ

ดังนั้นความต้านทานของ SnO_2 จะไวต่อปริมาณของออกซิเจนอิออนที่ปกคลุมที่พื้นผิว การเปลี่ยนแปลงการปกคลุมของออกซิเจนที่พื้นผิว จะเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าซึ่งในกรณีของรีดิวซิ่งแก๊ส อาทิ LPG CH_4 COจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนอิออนที่เกาะติดที่พื้นผิวของ SnO_2 เกิดการเผาไหม้ (Surface Catalyst Combusion) ออกซิเจนที่ปกคลุมพื้นผิวลดลงและทำให้กำแพงศักย์ไฟฟ้าลดลง อิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ค่าการนำไฟฟ้าจึงสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในบรรยากาศของแก๊สรีดิวซิ่งส์และออกซิเจน

สำหรับออกซิเจนที่ปกคลุมพื้นผิวจะสัมพันธ์กับความดันย่อยของแก๊สรีดิวซิ่งส์ อาทิ CO ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ คือ

$$\theta = \frac{k1\ P_{O_2}}{k_{-1} + k_1\ PO_2 + k_2\ P_{CO^2}}$$

เมื่อ θ = สัดส่วนพื้นที่ถูกปกคลุมด้วยออกซิเจนอิออน

k_1 = ค่าคงที่ของการดูดซับออกซิเจนบนพื้นผิว SnO_2

k_{-1} = ค่าคงที่ของการปลดปล่อยออกซิเจนจากพื้นผิว

k_2 = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CO และ ออกซิเจนบนพื้นผิว

ในกรณีที่อยู่ภายใต้ภาวะที่ $k_{-1} << P_{CO2}$ และ $k_1 << k_2\ P_{CO2}$ จะได้สัดส่วนของออกซิเจนที่ปกคลุมพื้นผิวผันแปรผกผันกับความดันย่อยของ CO จึงเป็นผลให้ความไวและการนำไฟฟ้าบนพื้นผิวขึ้นกับความดันย่อยของ CO หรือพวกแก๊สรีดิวซิงส์ ซึ่งเป็นหลักการที่นำมาใช้ในการประยุกต์ใช้กับตัวตรวจจับแก๊สรั่ว

2.2.2 Catalytic combustion sensor

ใน Combustion สามารถแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเผาไหม้แก๊สซึ่งเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิดังสัมการ

$$\underline{\Delta}R = \underline{\Delta}T = \underline{\alpha.}\ \underline{\Delta}H/C = \underline{\alpha}.\ a.\ m.\ Q/C \quad .....(1)$$

โดยที่

ΔR : ค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า เนื่องจากการเผาไหม้ของแก๊สด้วยขดลวด

α : สัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดต่ออุณหภูมิ

ΔT : อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้แก๊ส

C : Heat capacity ของขดลวด

m : ปริมาณแก๊ส

Q : ความร้อนในการเผาไหม้โมเลกุลของแก๊ส

a : ค่าคงที่สัมพัทธ์ของขดลวด

ค่า α, C และ a จากสมการที่ 1 สัมพันธ์กับคุณสมบัติ, รูปทรงและโครงสร้างของขดลวดส่วน Q ขึ้นกับชนิดของแก๊สและถ้ากำหนดให้ aQ/C = b แล้วสามารถแสดงสมการที่ 1 ได้ว่า

$$\Delta R = \alpha \cdot b \cdot m \quad .....(2)$$

จากสมการที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าขดลวด จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณ Gas ซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้ และค่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้า ความร้อนที่ไหลผ่านสะพาน Curcuit ในกรณีที่ต้องใช้งาน ควรทราบถึงความสัมพันธ์ของชนิดและปริมาณ Gas กับค่ากระแสที่ไหลผ่านสะพานไฟฟ้า สำหรับตัวตรวจสอบแก๊ส Methane นั้นอุณหภูมิของขดลวดโดยทั่วไปประมาณ 450-550° C