บทที่ 1

บทนำ

หัวตรวจวัดแก๊สเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าไปตามชนิดและปริมาณของแก๊ส ที่อยู่บริเวณผิว Heiland(1982) ได้จำแนกสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีการตอบสนองต่อสารเคมี (chemically-sensitive semiconductor devices,CSSD) โดยพิจารณาจากโครงสร้างของหัวตรวจวัด ออกเป็น 2 จำพวกใหญ่ๆ คือ จำพวกแรกจะประกอบด้วยหัวตรวจวัดที่มีโครงสร้างคล้ายไดโอด และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า(field effect transistors) เช่น Pd/Si , Pd/ZnO และ Pd/TiO_2 เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงหัวตรวจวัดแก๊สออกซิเจนที่มีการตอบสนองในอุณหภูมิสูงสร้างจาก ZrO_2 หรือสารชนิดอื่นที่มีการทำงานคล้ายคลึง และยังรวมถึงหัวตรวจวัดแบบอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ตรวจวัดในของเหลว ส่วนในจำพวกที่สอง จะเป็นกลุ่มของหัวตรวจวัดแก๊ส ที่มีสารกึ่งตัวนำเนื้อเดียวกัน (homogeneous semiconducting sensors) โดยมีโครงสร้างอันประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะสำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีการตอบสนอง หัวตรวจวัดแก๊สจำพวกนี้ไม่สามารถใช้ตรวจวัดในของเหลวได้

หัวตราจวัดแก๊สที่จะประดิษฐ์ขึ้นในที่นี้จะจัดเป็น CSSD ในจำพวกที่สอง และนับจากนี้ ถ้ากล่าวถึงหัวตรวจวัดแก๊สก็จะหมายถึงหัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำเนื้อเดียวกัน

หัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ ถูกนำมาใช้งานเป็นครั้งแรกโดย Seiyama, Kato, Fujiishi และ Nagatani(1962) ซึ่งได้ประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สจากสังกะสีออกไซด์(ZnO) ออกมาในแบบฟิล์มบาง(thin film) เพื่อใช้เป็นตัววัดสัญญาณ (detector)สำหรับแก๊สโครมาโตกราฟี ในปีเดียวกันนั้น Taguchi ได้ประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สขึ้นจากดีบุกออกไซด์(SnO_2) และต่อมาในปีค.ศ.1968 ได้มีการประดิษฐ์หัวตรวจ

วัดแก๊สจากดีบุกออกไซด์ แบบเซรามิก(ceramic) ในเชิงการค้าขึ้นเป็นครั้งแรก โดย Figaro Engineering Inc.

การวิจัยและพัฒนาหัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ ได้กระทำต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ทำให้มีหัวตรวจวัดแก๊สสำหรับการตรวจวัดแก๊สชนิดต่างๆ ปรากฏออกมาเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างของหัวตรวจวัดแก๊สที่ได้มีการพัฒนาแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สสำหรับแก๊สชนิดต่างๆ

สารกึ่งตัวนำ	สารเจือปน	ลักษณะ	แก๊สที่ตรวจวัด	อ้างอิง
SnO_2	Nb,V,Ti,Mo	ceramic	C_3H_8	Nitta, Kanefusa และHarodome(1978)
SnO_2	-	thin film	CO	Windischmann และ Mark(1979)
ZnO	Pt,Au,Pd, Ag	ceramic	C_2H_5OH	Heiland(1982)
SnO_2	Pt,Cu	ceramic	CO	
SnO_2	-	thin film	H_2S	
SnO_2	Pd-Au	thin film	NO_x	
SnO_2	Pd	thin film	C_2H_5OH, CO	Oyabu(1982)
SnO_2	-	ceramic	C_6H_6	Lalauze และ Pijolat(1984)

ตารางที่ 1.1(ต่อ) ตัวอย่างการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สสำหรับแก๊สชนิดต่างๆ

สารกึ่งตัวนำ	สารเจือปน	ลักษณะ	แก๊สที่ตรวจวัด	อ้างอิง
ZnO	-	single crystal	CO	Bott, Jones และ Mann(1984)
SnO_2	Pd,Bi	thick film	CH_4,CO	Coles และ Gallagher(1985)
SnO_2	-	thick film	CO	Romppainen,Torvela ,Vaananen และ Leppaauori(1985)
SnO_2	Pd	ceramic	H_2S	Kanefusa, Nitta และHarodome(1985)
SnO_2	Pd	ceramic	H_2,CH_4	Yasunaga, Sunahara และ Ihokura(1986)
SnO_2	ZrO_2	thick film	H_2S	Kanefusa, Nitta และHaradome(1988)
SnO_2	Pt	thin film	CO,H_2,CH_4, C_3H_8,C_4H_{10}	Leeและ Chung(1989)
SnO_2	MgO,CaO, SrO,BaO	ceramic	C_2H_5OH	Fukui(1989)
SnO_2	Al	thin film	H_2	Xu และ Tang (1992)
ZnO-SnO_2	-	ceramic	C_2H_5OH	Tianshu, Yesheng และMingrong(1992)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.1(ต่อ) ตัวอย่างการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สสำหรับแก๊สชนิดต่างๆ

สารกึ่งตัวนำ	สารเจือปน	ลักษณะ	แก๊สที่ตรวจวัด	อ้างอิง
SnO_2-TiO_2	Rh	thick film	CH_4	Lee, Chung และ Sohn(1992)
SnO_2	La_2O_3	ceramic	CO_2	Mizuno, Yoshioka และ Iwamoto(1992)
SnO_2	-	thin film	H_2	Reddy และ Chandorkar (1992)
SnO_2	La_2O_3-Pd,Pt	ceramic	C_2H_5OH	Maekawa, Tamaki, Miura และ Yamazoe (1992)
SnO_2	Pd	ceramic	H_2	Matsushima,Maekawa , Tamaki, Miura และ Yamazoe(1992)
SnO_2	CuO	ceramic	H_2S	Tamaki, Maekawa, Miura และ Yamazoe (1992)
SnO_2	In-V	thin film	NO_2	Low, Sulz, Lacher, Kuhner, Uptmoor, ReiterและSteiner (1992)

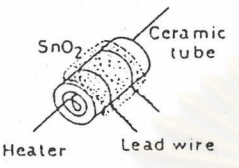
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตัวอย่างการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สดังในตารางที่ 1.1 นับแต่ในอดีตสืบเนื่องมาถึงปัจจุบัน จะพบว่าหัวตรวจวัดแก๊สส่วนใหญ่มีแนวโน้มสร้างขึ้นจาก ดีบุกออกไซด์ มากกว่า สังกะสีออกไซด์ จากแนวโน้มดังกล่าวพอจะแสดงให้เห็นว่าดีบุกออกไซด์มีความเหมาะสมต่อการนำมาประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊ส Heiland(1982)ได้กล่าวถึงเหตุผลหนึ่งซึ่งอาจทำให้ดีบุกออกไซด์เป็นวัสดุที่มีการนำมาประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊ส อย่างแพร่หลายกว่าสังกะสีออกไซด์ คือ อุณหภูมิใช้งานของหัวตรวจวัดแก๊สที่ทำจากดีบุกออกไซด์ จะมีค่าต่ำกว่าสังกะสีออกไซด์

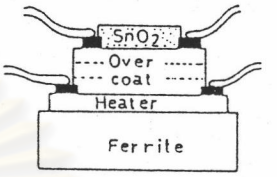
นอกจากนี้ Coles และ Gallagher(1985) ยังได้แสดงคุณลักษณะเด่นของหัวตรวจวัดแก๊สที่สร้างจากดีบุกออกไซด์ ไว้ดังนี้

- มีความไวสูง
- การตอบสนองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
- มีความจำเพาะในการตรวจวัดแก๊สบางจำพวก
- มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
- ใช้พลังงานน้อย

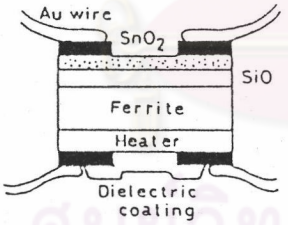
จากตารางที่ 1.1 จะพบว่าหัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากดีบุกออกไซด์ จะปรากฏออกมาในหลายแบบ ได้แก่ ฟิล์มบาง(thin film), ฟิล์มหนา(thick film), เซรามิก (ceramic) และผลึกเดี่ยว(single crystal) ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 1.1 ดังนั้นในการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งนอกจากต้องพิจารณาชนิดของสารกึ่งตัวนำแล้วยังต้องพิจารณาถึงแบบของหัวตรวจวัดแก๊สที่จะประดิษฐ์ขึ้น ว่ามีข้อดี หรือ ข้อเสียมากน้อยเพียงใดควบคู่กันไป เพื่อให้ได้หัวตรวจวัดแก๊สที่ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน การเปรียบเทียบหัวตรวจวัดแก๊สในแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 1.2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างหัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์ออกมาในแบบ ฟิล์มบาง , ฟิล์มหนา และ เซรามิก ส่วนหัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์ออกมาในแบบผลึกเดี่ยวนั้น จะไม่นำมาเปรียบเทียบในที่นี้ เนื่องจาก Morrison(1982)ได้กล่าวถึงหัวตรวจวัดแก๊สแบบผลึกเดี่ยวว่ามีการตอบสนองที่ต่ำมาก



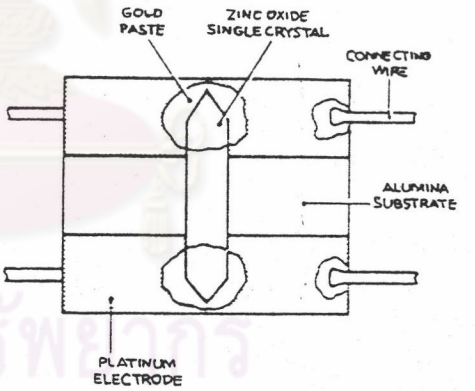
CERAMIC SENSOR



THICK FILM SENSOR



THIN FILM SENSOR



SINGLE CRYSTAL SENSOR

รูปที่ 1.1 หัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์ขึ้นมาในแบบต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบหัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์ขึ้นมาในแบบต่างๆ

CHARACTERISTICS	CERAMIC	THICK FILM	THIN FILM
Manufacturing Process	3	2	1
Microelectronic Compatibility	3	3	1
Variation of Sensitivity	3	2	1
Machanical Resistance	3	3	1
Sensitivity	1	2	3
Bulk Resistance in Parallel	3	3	1
Power Consumption	2	2	1
Cost	2	2	1

1 → 2 → 3 = GOOD → FAIR → BAD

จากตารางที่ 1.2 ได้แสดงให้เห็นว่าหัวตรวจวัดแก๊สแบบฟิล์มบาง มีข้อดีหลายประการ แต่มีข้อเสียอันเด่นชัดอยู่ 1 ประการ คือ มีความไวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับหัวตรวจวัดแก๊สอีก 2 แบบ แต่การเปรียบเทียบจากตารางที่ 1.2 นี้ จะเป็นการมองภาพรวมของการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สซึ่งโดยทั่วไปจะมุ่งวิจัยและพัฒนาหัวตรวจวัดแก๊สในแบบ เซรามิก เนื่องจากมีความไวสูง เพื่อสามารถนำไปตรวจวัดแก๊สที่ระดับความเข้มข้นเพียงไม่กี่ร้อย ppm สำหรับนำไปใช้งานในด้านตรวจวัด การเกิดหรือการรั่วไหลของแก๊สอันตรายที่มีโอกาสพบได้ในที่ชุมชน (town gas) ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างค่ากำหนด(specification) เกี่ยวกับ ลักษณะสมบัติด้านความไวของหัวตรวจวัดแก๊สสำหรับใช้ในการตรวจวัด town gas ของผู้ผลิตแก๊สบางรายในประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในตารางที่ 1.3 (Matsuura,1992)

ตารางที่ 1.3 ค่าความเข้มข้น(ppm)ของ town gas บางชนิดที่กำหนดให้หัวตรวจวัดแก๊ส สามารถตรวจวัดได้

	Gas	New Spec.(ppm)	Old Spec.(ppm)
Pre-Alarm	CH_4	300-1500*1	300-2000
	H_2	over400	200-2500
	C_2H_5OH	over500 *2	-
Alarm	CH_4	2000-5500	2000-5500
	H_2	over5000	2500-8000
	C_2H_5OH	over5000*2	over2000

*1 higher sensitivity

*2 decreasing the influence of another gas

ในการนำหัวตรวจวัดแก๊สไปใช้ตรวจวัด ปริมาณแอลกอฮอล์(เอทิลแอลกอฮอล์) ทางเทคโนโลยีชีวภาพนั้น ไม่มีความจำเป็นต้องใช้หัวตรวจวัดแก๊ส ที่มีความไวสูงดังเช่นหัวตรวจวัดสำหรับ town gas เพียงแต่ใช้หัวตรวจวัดแก๊สที่สามารถตรวจวัดปริมาณของแอลกอฮอล์ในช่วงความเข้มข้นประมาณ 1 ถึง 10%v/v โดยมีการตอบสนองต่อน้ำได้ต่ำที่สุดจะถือได้ว่ามีความเพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สจากดีบุกออกไซด์ในแบบฟิล์มบาง แม้ว่าจะมีการตอบสนองที่ต่ำกว่าอีกสองแบบแต่ยังคงมีข้อดีอื่นๆ อีกหลายประการดังเห็นได้จากตารางที่ 1.2

หัวตรวจวัดแก๊สได้เข้ามามีบทบาทอย่างกว้างขวางต่อคุณภาพชีวิต และ ในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากมีลักษณะเด่น อันได้แก่

1. ความต้านทานไฟฟ้าของหัวตรวจวัดแก๊สจะมีความสัมพันธ์ แบบลอการิทม กับความเข้มข้นของแก๊ส อันอาจจะทำให้มีช่วงการตรวจวัดกว้าง
2. เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า อันเป็นผลตอบสนองของหัวตรวจวัดแก๊สมีค่าสูง จึงทำให้สัญญาณที่ได้ไม่จำเป็นต้องผ่านวงจรขยาย
3. ในกรณีที่หัวตรวจวัดแก๊ส ทำจากดีบุกออกไซด์ซึ่งมีความเสถียร ทำให้หัวตรวจวัดแก๊สมีความเสถียร, มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และยังทนต่อแก๊สที่กัดกร่อนได้
4. มีขนาดเล็ก และราคาถูก

การนำหัวตรวจวัดแก๊ส ไปใช้งานในด้านต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.4 (FIGARO GAS SENSOR,1991) ผลผลิตหัวตรวจวัดแก๊สในปี ค.ศ.1991 ในประเทศญี่ปุ่นสำหรับแก๊สหุงต้ม(LP-gas) และ town gas มีปริมาณสูงถึง 3.1ล้านตัว และ 1.7ล้านตัว ตามลำดับ(Matsuura,1992)

สำหรับในทางเทคโนโลยีชีวภาพ หัวตรวจวัดแก๊สได้เข้ามามีบทบาทในขบวนการผลิตแอลกอฮอล์จากการหมัก ซึ่งเป็นขบวนการที่ถูกใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์มากที่สุด หัวตรวจวัดแก๊สจะถูกนำมาใช้ตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในระหว่างขบวนการหมัก เพื่อควบคุมขบวนการให้เกิดผลผลิตสูงสุดจากต้นทุนที่ต่ำสุด อันเป็นเป้าหมายสำคัญของขบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ โดยทั่วไปการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในระหว่างขบวนการหมักอาจแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ ได้แก่ วิธีการทางเคมีและการใช้เครื่องมือ ดังตัวอย่างในภาคผนวก ก ซึ่งการใช้วิธีทั้งสองอาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับ ความยุ่งยาก, สิ้นเปลืองเวลา และค่าใช้จ่าย ดังนั้นการใช้หัวตรวจวัดแก๊สจึงนับเป็นอีกวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยลดปัญหาเหล่านี้ลงได้

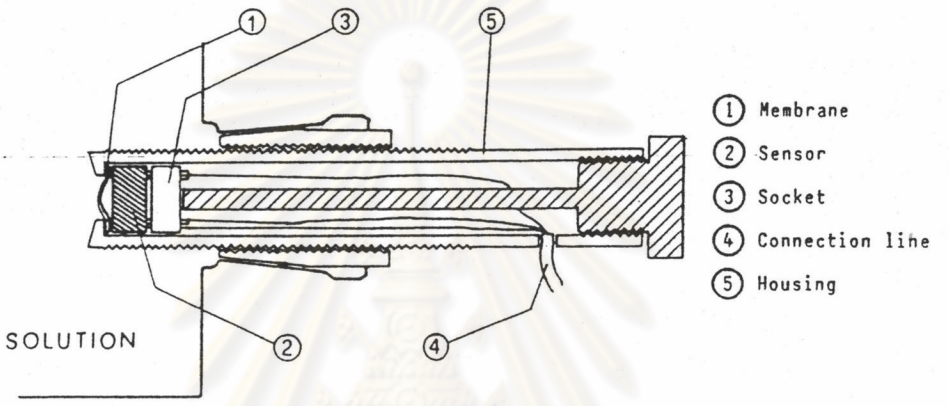
ตารางที่ 1.4 ตัวอย่างการนำหัวตรวจวัดแก๊สไปใช้งาน

การใช้งาน	ตัวอย่าง
เครื่องตรวจวัด	- เครื่องตรวจวัดปริมาณแก๊สอันตรายเช่น H_2,CH_4,H_2S และ CO เป็นต้น - เครื่องตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในปอดของผู้ขับขี่ยวดยาน - เครื่องตรวจวัดกลิ่นปาก
เครื่องใช้ในบ้าน	- ควบคุมการปรุงอาหารในเตาอบไมโครเวฟ - ควบคุมการทำงานของเครื่องฟอกอากาศ
เครื่องเตือนภัย	- เครื่องเตือนการเกิดหรือการรั่วไหลของแก๊สอันตราย เช่น LPG,H_2,H_2S,CO และ ควันไฟ เป็นต้น
อุตสาหกรรม	- การวิเคราะห์ปริมาณ H_2 ในเตาหลอมโลหะ - การตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในสารละลาย - การทดสอบปริมาณ H_2 ในน้ำมันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการนำหัวตรวจวัดแก๊สไปใช้ตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ ทางเทคโนโลยีชีวภาพนั้น Vorlop, Becke และ Klein(1983) ได้นำหัวตรวจวัดแก๊ส TGS-812 ซึ่งผลิตโดย Figaro Engineering Inc. มาประกอบเป็นหัววัดที่เรียกว่า GAS-SENSOR -DIP-ELECTRODE(GSDE) ดังแสดงใน รูปที่ 1.2 ซึ่งหัววัดดังกล่าวสามารถวัดปริมาณแอลกอฮอล์ได้โดยตรงจากในน้ำหมัก(fermentation liquid) โดยใช้เยื่อซิลิโคนสำหรับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ป้องกันของเหลว ทำให้มีเพียงแก๊สเท่านั้นที่สามารถผ่านเยื่อซิลิโคนเข้าไปสู่หัวตรวจวัดแก๊สได้ ซึ่งเวลาการตอบสนองของ GSDE มีค่าสูงถึง 10 นาที เมื่อใช้เยื่อซิลิโคนหนา 0.5mm



รูปที่ 1.2 ลักษณะของ GAS-SENSOR-DIP-ELECTRODE(GSDE)

โดยทั่วไปในน้ำหมักแอลกอฮอล์อาจมี แอมโมเนีย และอะซิตัลดีไฮด์ปะปนอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อย ซึ่ง Vorlop และ คณะ(1983) ได้กล่าวว่าหัวตรวจวัดแก๊ส TGS-812 ไม่ปรากฏการตอบสนองต่อสารทั้งสองชนิด

Mandenius,Mattiasson,Axelssonและ Hagander(1987) ได้นำหัวตรวจวัดแก๊ส TGS-812 มาใช้สำหรับการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำหมัก ด้วยระบบตรวจวัดที่ไม่ใช้ GSDE แต่จะใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สพาห์สำหรับนำไอระเหยของแอลกอฮอล์จากในน้ำหมัก ซึ่งผ่านเยื่อซิลิโคนหนา 0.2mm ไปสู่หน่วยเจือจาง(dilution unit) ที่สามารถเจือจางไอระเหยของแอลกอฮอล์ให้ลดลงได้ ตั้งแต่ 2 เท่า ถึง 1000 เท่า ก่อนเข้าสู่หัวตรวจวัดแก๊สต่อไป

จากตัวอย่างการนำหัวตรวจวัดแก๊สไปใช้งานทางเทคโนโลยีชีวภาพนั้น จะพบว่าล้วนแต่เป็นการนำหัวตรวจวัดแก๊ส TGS-812 ไปใช้งานทั้งสิ้น ซึ่งอันที่จริงแล้วหัวตรวจวัดแก๊สดังกล่าวไม่ได้ผลิตขึ้นสำหรับใช้ในงานทางเทคโนโลยีชีวภาพโดยเฉพาะ ดังเห็นได้จากในการตรวจวัดแอลกอฮอล์ของ Mandenius และคณะ(1987) จะมีหน่วยเจือจางในระบบตรวจวัด เหตุผลที่ทำให้จำเป็นต้องมีหน่วยเจือจางในระบบตรวจวัดนั้น คาดว่าเนื่องมาจากหัวตรวจวัดแก๊ส TGS-812 มีความไวสูงมากเกินไป

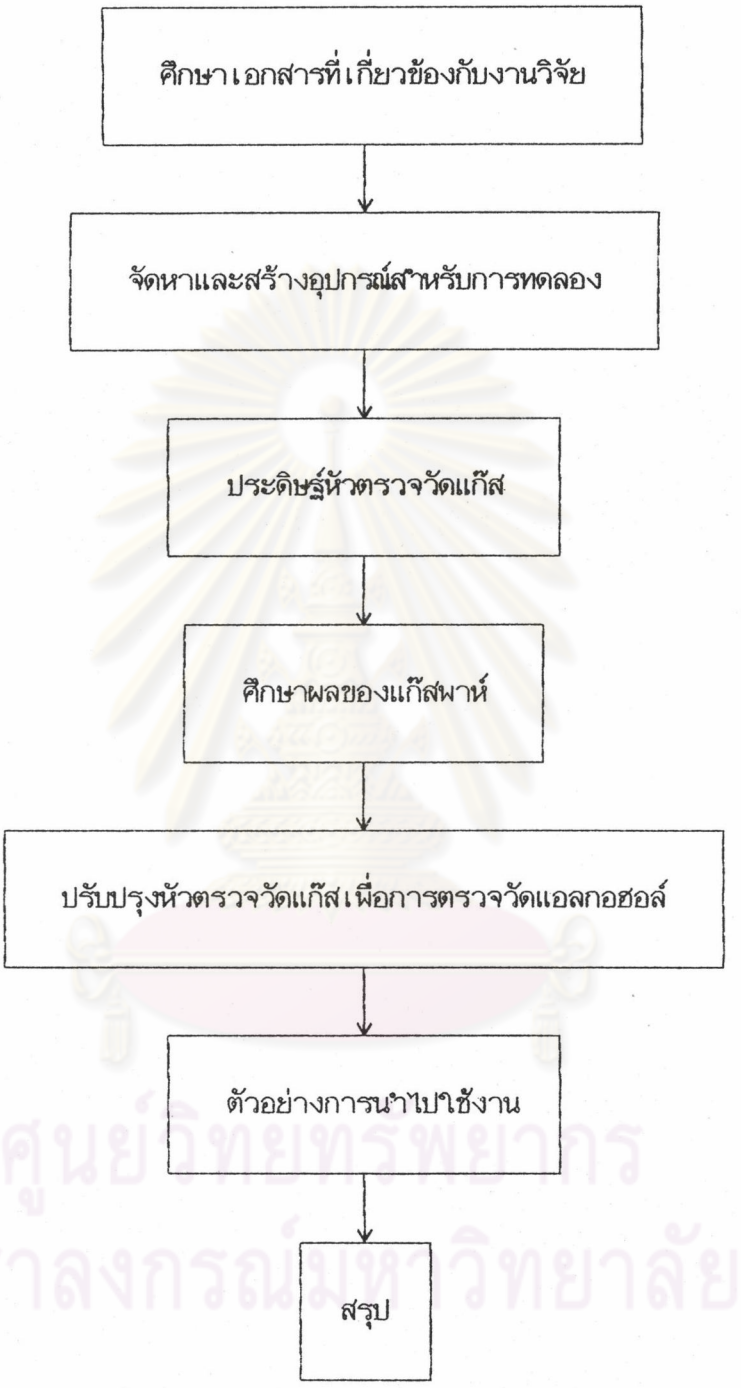
ดังนั้นการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊ส เพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ทางเทคโนโลยีชีวภาพขึ้นใช้เอง อาจทำให้ได้หัวตรวจวัดแก๊สที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานได้ดีกว่าหัวตรวจวัดแก๊ส TGS-812 แม้ว่าในปัจจุบันหัวตรวจวัดแก๊ส TGS-812 จะได้รับการพัฒนาเป็น TGS-822 แล้วก็ตาม แต่ยังคงมีความไวสูงเช่นเดิม

เท่าที่ได้ทำการสืบค้นข้อมูลภายในประเทศ ยังไม่ปรากฏว่ามีการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สจากฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่างานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการประดิษฐ์หรือพัฒนา หัวตรวจวัดแก๊สจากดีบุกออกไซด์แบบฟิล์มบาง จะเป็นจุดเริ่มต้นของการประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สภายในประเทศ อันจะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาหัวตรวจวัดแก๊สชนิดอื่นๆ ต่อไป

<u>วัตถุประสงค์ของงานวิจัย</u>

1. ประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สจากสารกึ่งตัวนำขึ้นใช้เองภายในประเทศ
2. ศึกษาผลของออกซิเจนในแก๊สพาห์ ที่มีต่อการตอบสนองของหัวตรวจวัดแก๊ส
3. ปรับปรุงหัวตรวจวัดแก๊สเพื่อการตรวจวัดแอลกอฮอล์สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางเทคโนโลยีชีวภาพ

สำหรับขอบเขตของงานวิจัยแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย