



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค ระยะที่ 1

Fuel Gas Production using Plasma arc Technique Phase 1

โดย

TNI

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

รายงานการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

2556

ชื่อเรื่อง : เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค ระยะที่ 1

ผู้วิจัย : ผ.ศ. ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต

สถาบัน : สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2556

สถานที่พิมพ์ : สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

แหล่งที่เก็บรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ จำนวนหน้างานวิจัย : 62 หน้า

: ฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

คำสำคัญ

ลิขสิทธิ์ : สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

: ก๊าซเชื้อเพลิง, ก๊าซซีพีเคชั่น, พลาสมาอาร์ค, แมกเนทูล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสมาอาร์คได้ของเหลวสำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก ในระยะที่ 1 โดยได้ศึกษาทฤษฎีหลักการผลิตก๊าซพลาสมาอาร์คได้ของเหลว อิเล็กโตรแมกเนทูล สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คได้น้ำ และการดิสชาร์จไฟฟ้าในฉนวนเหลว เพื่อที่จะนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซให้มีประสิทธิภาพ และใช้งานได้จริง โดยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงออกแบบไว้สำหรับรองรับความดันในถังปฏิกรณ์ได้สูงสุด 20 bar ใช้กำลังไฟฟ้าในการอาร์คไฟฟ้า 20 KW ที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยอัตรา 227 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง ต่อเนื่อง 1-2 สัปดาห์ โดยไม่ต้องเปลี่ยนแผ่นกราไฟต์ ทั้งนี้สามารถเปลี่ยนขนาดแผ่นกราไฟต์ เพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการอาร์คได้ถึง 150 KW ที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิง 1,700 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง สำหรับการสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในระยะที่ 1 เป็นการจัดเตรียม ถึงปฏิกรณ์ ชุดอุปกรณ์แกนเชิงเส้น ขั้วไฟฟ้าแผ่นกราไฟต์ เกจวัดความดัน เกจวัดอุณหภูมิ เกจวัดอัตราการไหล อุปกรณ์วัดระดับของเหลว บั๊มของเหลวแรงดันสูง กล้องควมคุมมอเตอร์แบบกึ่งอัตโนมัติ และ ออสซิลโลสโคปแบบพกพา เพื่อเตรียมการสร้างและทดสอบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คที่สมบูรณ์ ในระยะถัดไปได้

Title : Fuel Gas Production using Plasma arc Techniqe Phase 1

Researcher : Asst.Prof. Triratana Metkarunchit

Institution : Thai-Nichi Institute of technology

Year of publication : B.D.2556

Publisher : Thai-Nichi Institute of technology

Sources

No. of page : 62 page

: Research and Academic Services Department Thai-Nichi Institute of technology

Keyword

Copy right : Thai-Nichi Institute of technology

: fuel gas, gasification, plasma arc, magnecule

Abstract

This research is about design and build gas production by plasma submerged arc in liquid machine to apply to small and medium industry. The first phrase, we study gas plasma arc production in liquid theory, electromagnecule, performance coefficient of plasma submerged arc in liquid reaction and electric discharging liquid insulator to apply to design and build practical and effective gas production machine. The gas production machine was designed for pressure supported in reactor maximum to 20 bar. Use electric power to electric arc 20KW. The machine is able to produce gas continually 1-2 weeks with rate of 227 cubic feet per hour by no need to replace the graphite. Moreover, it can be changed size of the graphite to increase electric power to 150 KW to arc. It can produce gas 1,777 cubic feet per hour. The first phrase, construction gas production gas machine is to prepare reactor, linear axis equipment, electrode graphite, pressure gauge, temperature gauge, flow rate gauge, liquid level measure equipment, high pressure liquid pump, semi-automatic motor controller and handheld oscilloscope to build and test the complete gas production by plasma arc machine in the next phrase.

ค
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1.6 แผนดำเนินงานตลอดโครงการ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค	6
2.1 หลักการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คโพลาร์	6
2.2 คุณสมบัติของก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คได้น้ำ	8
2.3 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของปฏิกิริยาการอาร์คได้น้ำ	13
2.3.1 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ใช้น้ำเป็นของเหลว	14
2.3.2 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ใช้สารหล่อเย็นเป็นของเหลว	17
2.4 ทฤษฎีการดิสชาร์จไฟฟ้าในฉนวนเหลว	20
2.4.1 คุณสมบัติของฉนวนเหลว	20
2.4.2 การนำไฟฟ้าของฉนวนเหลว	21
2.4.3 กลไกการเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว	22
2.4.4 แรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว	25
2.4.5 ก๊าซเหลว	30
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค	32
3.1 การออกแบบตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์ค	32
3.2 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค	35
3.2.1 การออกแบบส่วนถังปฏิกรณ์เครื่องผลิตก๊าซ	35
3.2.2 การออกแบบกระบวนการทำงานผลิตก๊าซ	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	
การสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสติก ระยะที่ 1	41
4.1 การสร้างตัวถังปฏิกรณ์	41
4.2 การจัดสร้างอุปกรณ์และชิ้นส่วนที่ติดตั้งกับถังปฏิกรณ์ ระยะที่ 1	44
4.3 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตและเครื่องมือวัด	49
บทที่ 5	
สรุปผลและงานวิจัยถัดไป	53
5.1 สรุปผลการวิจัย	53
5.2 งานวิจัยถัดไป	54
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวก	56



TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนดำเนินงานตลอดโครงการ	5
ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม (kcal/mol. $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	14
ตารางที่ 2.2 การแปลงหน่วยพลังงานและปริมาตร	15



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 หลักการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค	2
รูปที่ 1.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสมาอาร์คในประเทศสหรัฐอเมริกา	
รูปที่ 1.3 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขนาดเล็กด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค ผลงานวิจัย ของ ร้อยตรี ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	4
รูปที่ 2.1 หลักการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คโพลว์	7
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้วิธีพลาสมาอาร์คโพลว์	
รูปที่ 2.3 วงโคจรของอิเล็กตรอนที่มีโพลาริซ์แบบทอรรอยด์ที่เกิดขึ้นจากภายในได้ สนามแม่เหล็กความเข้มสูงภายนอก	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแมกเนทูปพื้นฐานที่ประกอบด้วยโมเลกุลพันธะคู่ ยึดเหนี่ยวกับ อะตอมเดี่ยวหรือโมเลกุลพันธะคู่ ด้วยสนามแม่เหล็กที่มีโพลาริซ์ตรงข้ามกัน ที่เกิดจากวงโคจรอิเล็กตรอนที่มีโพลาริซ์แบบทอรรอยด์	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของ CO ที่ได้มาจากการอาร์คได้น้ำ อะตอม O และ H จะถูก ยึดเหนี่ยวกันด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มสูงที่มีขั้วตรงกันข้าม จากวงโคจรของ อิเล็กตรอนแบบทอรรอยด์ แทนที่จะเป็นพันธะเวเลนซ์สามเหมือน โมเลกุล CO ทั่ว ไป	12
รูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในทางทฤษฎี ของตัวปฏิกรณ์ พลาสมาอาร์คโพลว์ ในฟังก์ชันความสัมพันธ์การใช้หมดไปของสารตั้งต้น r ระหว่าง เอทิลีน ไกลคอล กับ แท่งคาร์บอน โดย $0 \leq r \leq 20$	19
รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในทางทฤษฎี ของตัวปฏิกรณ์ พลาสมาอาร์คโพลว์ ในฟังก์ชันความสัมพันธ์การใช้หมดไปของสารตั้งต้น r ระหว่าง เอทิลีน ไกลคอล กับ แท่งคาร์บอน โดย $0 \leq r \leq 2$	19
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน	21
รูปที่ 2.9 ทฤษฎีของ Townsend	23
รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นและสนามไฟฟ้าเบรกดาวนของของเหลว	26
รูปที่ 2.11 ความดันและสนามไฟฟ้าเบรกดาวนของของเหลว	26
รูปที่ 2.12 แรงดันเบรกดาวนของน้ำมันหม้อแปลง	27
รูปที่ 2.13 ผลของหยดน้ำและเส้นใย	28
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างแรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลง	30
รูปที่ 2.15 แรงดันเบรกดาวนของก๊าซเหลว	31
รูปที่ 2.16 แรงดันเบรกดาวนกับความหนาแน่นของ CO_2	31

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 รูปแบบตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คได้ของเหลว	33
รูปที่ 3.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสมาอาร์คได้ของเหลว	35
รูปที่ 3.3 แบบแปลนด้านข้างฝาดังปฏิกรณ์	37
รูปที่ 3.4 แผนผังกระบวนการทำงานเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	38
รูปที่ 4.1 แบบแปลนถังปฏิกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้น	41
รูปที่ 4.2 แบบแปลนฝาดังปฏิกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้น	42
รูปที่ 4.3 ตัวถังปฏิกรณ์ที่จัดทำขึ้นจากท่อเหล็กแรงดัน 2 ท่อเชื่อมต่อกัน	43
รูปที่ 4.4 ถังปฏิกรณ์เปล่าที่ได้จัดทำขึ้น ติดตั้งไว้กับฐานรองรับ	44
รูปที่ 4.5 สวิตช์ลูกกลยวัดระดับของเหลว 3 ระดับ และเกจวัดอุณหภูมิ ที่เตรียมติดตั้งไว้กับฝาดัง	45
รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ที่เตรียมไว้ติดตั้งกับฝาดัง ประกอบด้วยเกจวัดความดัน ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ และแท่งทองแดงส่งผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในถังปฏิกรณ์	46
รูปที่ 4.7 ชุดติดตั้งขั้วไฟฟ้าแผ่นกราไฟต์แคโทด	47
รูปที่ 4.8 ด้านบนของ Linear axis แกนนอน ติดตั้งไว้กับชุดขั้วไฟฟ้าแผ่นกราไฟต์แคโทด	48
รูปที่ 4.9 ด้านข้างของ Linear axis แกนนอน ติดตั้งไว้กับชุดขั้วไฟฟ้าแผ่นกราไฟต์แคโทด	48
รูปที่ 4.10 ชุดปั๊มของเหลวประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 KW และ หัวปั๊มแรงดันสูง	49
รูปที่ 4.11 ออสซิลโลสโคปแบบพกพา 20 MHz	50
รูปที่ 4.12 ชุดอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์สำหรับ Linear axis แกนตั้งและแกนนอน	51

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานที่สะสมอยู่ตามธรรมชาติกำลังจะหมดไป เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ยูเรเนียม ทั้งนี้คาดว่าน้ำมันและก๊าซจะถูกใช้จนหมดประมาณ 40 ปี และ 62 ปี ข้างหน้านี้ โดยในปี พ.ศ. 2555 ประเทศไทยนำเข้าพลังงานคิดเป็นมูลค่ารวม 1.44 ล้านล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปี 2554 16.7% โดยส่วนใหญ่เป็นมูลค่าจากการนำเข้าน้ำมันดิบถึง 78% มีมูลค่าถึง 1.122 ล้านล้านบาท [1] เป็นผลมาจากปริมาณนำเข้าที่สูงขึ้น ประกอบกับราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกเฉลี่ยสูงขึ้นที่ 114 ดอลลาร์สหรัฐต่อบาร์เรล และมีการนำเข้าก๊าซธรรมชาติเหลว หรือแอลเอ็นจีเพิ่มขึ้นด้วยโดยการใช้พลังงานในปัจจุบันแบ่งเป็น ใช้ในภาคอุตสาหกรรมอยู่ที่ร้อยละ 36.7 ภาคการขนส่งร้อยละ 35.8 และใช้อยู่ในบ้านที่อยู่อาศัยและธุรกิจการค้าร้อยละ 22.3 [2] จะเห็นได้ว่าภาคอุตสาหกรรมและขนส่งนั้นใช้พลังงานสูงสุด

ในขณะที่ รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ในประเทศ ประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ขยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ เอทานอล และไบโอดีเซล ด้วยการมีแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและทางเลือกให้ได้ 25% ใน 10 ปี พ.ศ.2555-2564 ส่งผลให้ในปี 2555 ที่ผ่านมามีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจากปี 2554 14.3% คิดเป็นสัดส่วน 9.9% ของการใช้พลังงานทั้งหมด [1] โดยมีการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบ ความร้อน ไบโอดีเซล เอทานอล และไฟฟ้า ร้อยละ 78.4 10.4 5.0 และ 6.2 ของพลังงานทดแทนทั้งหมด ตามลำดับ [1]

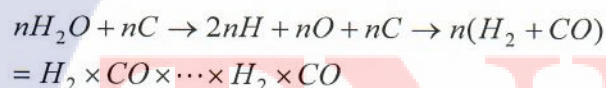
อย่างไรก็ตามความต้องการใช้พลังงานภายในประเทศไทย ได้ขยายตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และท่ามกลาง สถานการณ์ราคาน้ำมันในตลาดโลกที่ปรับตัวสูงขึ้นเช่นกัน จึงก่อให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรงที่ไม่อาจปฏิเสธได้ นอกจากนี้พลังงานทดแทนน้ำมัน เช่น ก๊าซโซฮอลล์ และไบโอดีเซล แท้จริงแล้วมีราคาต้นทุนที่สูงกว่าน้ำมันเบนซินและดีเซล แต่สามารถจำหน่ายในราคาที่ถูกลงได้ เพราะการอุดหนุนจากภาครัฐบาล ในขณะที่ก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในประเทศ ส่วนใหญ่ผลิตได้มาจากอ่าวไทย โดยประเทศไทยมีปริมาณสำรองก๊าซธรรมชาติประมาณ 7,361 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุต ทั้งนี้ ก๊าซธรรมชาติร้อยละ 60 ที่ผลิตได้นำไปใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้า [3] และก๊าซธรรมชาติส่วนที่เหลือส่งให้กับ โรงงานอุตสาหกรรม โรงแยกก๊าซ และใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะ ส่วนการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas: LPG) ในประเทศไทยในปี 2555 มีการใช้ก๊าซ 8,433 ล้านลิตร [1] โดยใช้ในภาคครัวเรือน 42 % ภาคปิโตรเคมี 33 % ให้ความร้อนในภาคอุตสาหกรรม

11 % ภาคขนส่ง 14 % [4] โดยราคา LPG ในประเทศไทยในปัจจุบัน ทางรัฐบาลได้ปล่อยลอยตัวราคาก๊าซ LPG ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อสะท้อนต้นทุนที่แท้จริงและลดการนำเงินกองทุนน้ำมันเชื้อเพลิงมาอุดหนุน โดยปัจจุบันราคา LPG ภาคอุตสาหกรรมถูกตรึงไว้ที่ 30.13 บาทต่อกิโลกรัม ภาคขนส่ง 21.38 บาทต่อกิโลกรัม และภาคครัวเรือน 18.13 บาท ต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามรัฐบาลได้มีนโยบายปล่อยลอยตัวราคาก๊าซในภาคครัวเรือนและขนส่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลักลอบใช้ผิดประเภท โดยคาดว่าในเดือน มิถุนายน พ.ศ. 2557 ราคาก๊าซ LPG ในภาคครัวเรือนและขนส่งจะถูกรับขึ้นไปที่ 24.82 บาทต่อกิโลกรัม



รูปที่ 1.1 หลักการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค

งานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างเครื่องผลิตก๊าซ ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์อุตสาหกรรม และเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนได้ โดยก๊าซที่ผลิตได้จะมาจากการสังเคราะห์ ของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำ และเชื้อเพลิงแข็งคาร์บอนผ่านกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 1.1 เมื่อน้ำที่ผ่านเข้ามาในระหว่างการอาร์คระหว่างแท่งคาร์บอนจะเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดก๊าซที่มีโครงสร้างของโมเลกุลในรูปแบบ magneuclear เขียนสมการเคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ได้ดังนี้ [5]



ทั้งนี้ส่วนประกอบและปริมาณแก๊สที่ผลิตได้จากปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยคือ ชนิดของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำ ส่วนประกอบของสารในแท่งคาร์บอน ขนาดของแท่งคาร์บอน พลังงานไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป อัตราการไหลของน้ำ อัตราการป้อนแท่งคาร์บอน และความดัน เป็นต้น โดยก๊าซที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้ โดยวิธีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คโพลาร์ มีสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance : COP) ที่สูง [6]

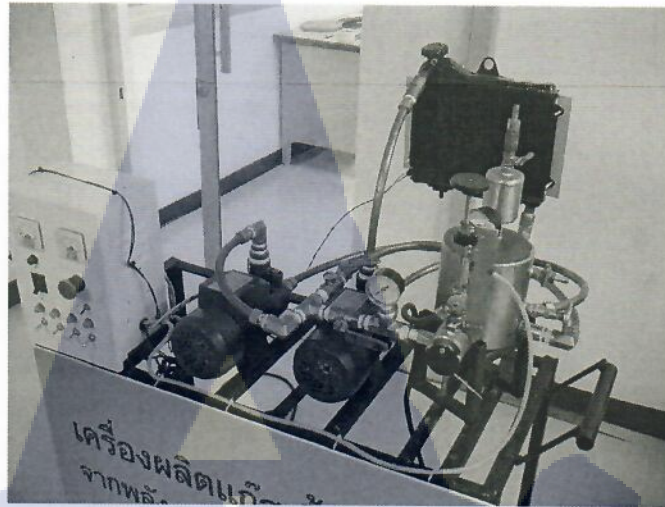
$$\text{COP} = \frac{\text{Energy stored in fuel gas} + \text{Heat total}}{\text{Supplied electrical energy}}$$

$$\text{COP} = \frac{(871 \text{ BTU/scf} + 500 \text{ BTU/scf})}{(332 \text{ BTU/scf})} = 4.13 \text{ หรือ } 413\%$$

จะเห็นได้ว่าการผลิตก๊าซด้วยวิธีพลาสมาอาร์คมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงถึง 413% เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คนี้ ทำให้เกิดก๊าซที่ทำให้ก๊าซ H_2 มีพันธะแม่เหล็กแบบแมกเนทูล และปริมาณก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่จะไม่กลับรวมตัวเป็นน้ำอีกครั้งหนึ่ง จากประสิทธิภาพเชิงพลังงานนี้ ทำให้เราสามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในราคาที่ถูกได้ โดยงานวิจัยที่ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้มีการวิจัยทั้งประเทศ สหรัฐอเมริกา และยุโรป และบริษัทต่าง ๆ กำลังผลิตเครื่องเพื่อออกจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยตัวอย่างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นอยู่ในรูปที่ 1.2 และ 1.3



รูปที่ 1.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสมาอาร์คในประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 1.3 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขนาดเล็กด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค ผลงานวิจัยของ ร้อยตรี ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต [7]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการที่ใช้สำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบเครื่องต้นแบบ ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คจาก น้ำและน้ำมันหล่อเย็นใช้แล้ว ในระยะที่หนึ่ง
- 1.2.3 เพื่อจัดเตรียม อุปกรณ์ ชิ้นส่วน และเครื่องมือวัดต่างๆ ที่สำคัญสำหรับสร้างเครื่อง ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่การสร้างเครื่องต้นแบบ พลาสมาอาร์ค เพื่อใช้ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากน้ำและน้ำเสีย ขนาด 20 KW ในระยะที่หนึ่ง ที่ประกอบด้วย ถึงปฏิกรณ์ ชิ้นส่วนส่วนกลไก ภายในถึงปฏิกรณ์ เครื่องมือวัด ปัมเป้แรงดันสูง และชุดอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ โดยเครื่องต้นแบบนี้ ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดเล็ก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 จัดเตรียมเครื่องต้นแบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากโดยเทคนิคพลาสมาอาร์คระยะที่หนึ่ง
- 1.4.2 องค์ความรู้เพื่อใช้พัฒนาต่อยอดการวิจัย
- 1.4.3 ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสาร หรือการประชุมนานาชาติ และ/หรือ สิทธิบัตรเครื่องต้นแบบ

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากพลังงานไฟฟ้าและชีวมวล โดย ร้อยตรี ศิริรัตน์ เมตต์การุณจิต
ภายใต้ทุนมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตฯ ระยะเวลาโครงการ ๘ เดือน ตั้งแต่เดือน กันยายน ๒๕๕๐ –
พฤษภาคม ๒๕๕๑

โดยงานวิจัยในครั้งนี้จะเป็นการปรับปรุง ให้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยปรับปรุงโครงสร้างของตัวทำปฏิกิริยา ร่วมกับการใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

[illegible]

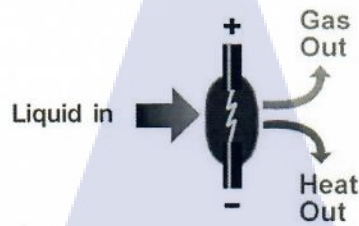
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค

วิธีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากการอาร์คไฟฟ้าได้นำ ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ในศตวรรษที่ 19 ที่ถูกเรือได้เชื่อมไฟฟ้าได้นำที่ตัวเรือในยุคเริ่มแรกที่ตัวเรือสร้างมาจากเหล็ก ในขณะที่เดียวกันถูกเรือได้ค้นพบว่าฟองก๊าซที่ลอยขึ้นจากการเชื่อมที่ผิวน้ำนั้นสามารถจุดให้ติดไฟได้ แต่ในเวลานั้นยังไม่มีใครได้นำวิธีดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1898 H. Eldridge. เป็นคนแรกที่ได้จดสิทธิบัตรเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากการอาร์คได้นำ ต่อมาในศตวรรษที่ 20 ได้คนมีการจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงโดยการอาร์คด้วยไฟฟ้าได้นำอีกมากมาย เช่น W.A. Dammann และ D. Wallman และในปี 1995 W.H. Richardson, jr. ได้จดสิทธิบัตรเรื่อง "Electrical power generation without harmful emissions" ซึ่งกระบวนการผลิตก๊าซที่ได้ของเขานั้นจะใช้อาร์คระหว่างแท่งคาร์บอน กับน้ำ หรือของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำเช่น น้ำทะเล ทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงชนิดใหม่ ที่มีชื่อเรียกเฉพาะว่า "Aquafuel" ต่อมาได้มีการวิจัยคุณสมบัติของก๊าซชนิดนี้อย่างกว้างขวาง เช่น องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration ; NASA) ได้นำก๊าซ Aquafuel ไปวิเคราะห์อย่างละเอียด ถึงองค์ประกอบก๊าซ รวมถึงการทดสอบใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามสิทธิบัตรดังกล่าวก็ยังไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตก๊าซเชิงพาณิชย์ เนื่องจากปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ยังไม่คุ้มทุน จนกระทั่งในปี 1999 ศาสตราจารย์ R. M. Santilli ประธานสถาบันวิจัย Institute for Basic Research ที่มหาวิทยาลัย Harvard ได้ค้นพบวิธีการที่สามารถผลิตก๊าซจากการอาร์คด้วยไฟฟ้าระหว่าง คาร์บอนและน้ำอย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ ที่สามารถนำไปผลิตเป็นอุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์ โดยวิธีนี้มีชื่อเรียกว่า "Plasma-Arc-Flow" [5]

2.1 หลักการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คโพลว์

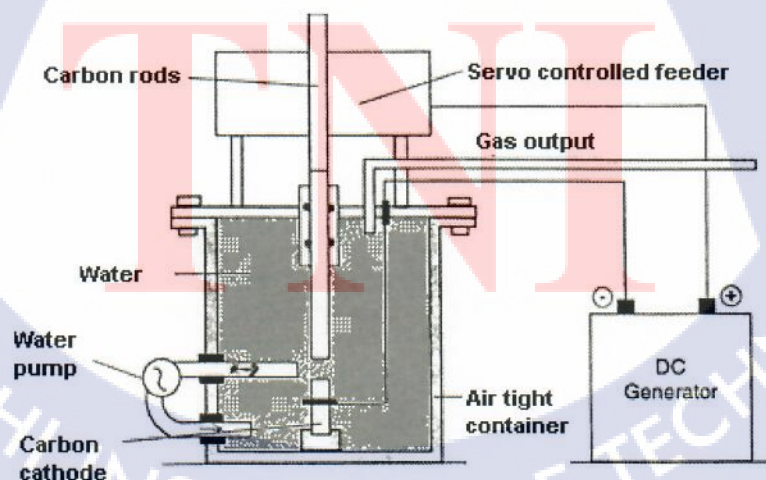
การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คโพลว์ (PlasmaArcFlow) นั้นเป็นกระบวนการส่งผ่านของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำลำเลียงไปยังส่วนที่มีอาร์คด้วยไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้แท่งคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า ดังรูป 2.1 การอาร์คนั้นจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 25 – 35 โวลต์ ผ่านขั้วไฟฟ้าคาร์บอนจะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นในขณะที่น้ำลำเลียงผ่านบริเวณการอาร์ค ดังรูปที่ 2.1 ในการอาร์คไฟฟ้านี้จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนปริมาณสูง และมีอุณหภูมิสูงกว่า $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในกระบวนการนี้จะเกิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูง และมีการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลต ความเข้มสูงออกมา



รูปที่ 2.1 หลักการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คโพลว์

กระบวนการอาร์คได้น้ำระหว่างแท่งคาร์บอนจะทำให้ น้ำและผิวแท่งคาร์บอนจะระเหิดเป็นไอ และถูกไอออไนซ์ (ionize) ทำให้เกิดพลาสมาของอะตอม H, O และ C ที่มีอุณหภูมิสูง ในขณะเดียวกันนั้นก็มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงระหว่างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนทั้งสอง เมื่อพลาสมาไหลผ่านออกไปจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา พลาสมาจะเย็นตัวลง จากการถ่ายเทความร้อนออกไปให้กับน้ำบริเวณรอบ ๆ ทำให้เกิดฟองก๊าซเชื้อเพลิงลอยขึ้นไปบริเวณผิวน้ำ ก๊าซที่ได้จะมีองค์ประกอบของไฮโดรเจน ประมาณ 50 % และคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 %

หลักการที่สำคัญที่ทำให้มีการผลิตก๊าซอย่างมีประสิทธิภาพ ก็คือการที่ลำเลียงน้ำผ่านขั้วไฟฟ้าคาร์บอนทั้งสอง ถ้าพลาสมาเหล่านั้นยังอยู่ใกล้กับจุดที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งมีอุณหภูมิสูง พลาสมาของอะตอม H และ O จะกลับมารวมตัวกันเป็นน้ำ อีกครั้งหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสมาของอะตอม H และ O รวมตัวกันได้นั้น จึงจำเป็นต้องมีแรงดันน้ำฉีดไปที่ตำแหน่งการอาร์คระหว่างขั้วไฟฟ้าคาร์บอน โดยระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแรงดันน้ำจะ ผลักดันพลาสมาที่เกิดขึ้นออกจากจุดที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นทันที ทำให้อุณหภูมิของพลาสมาลดลงอย่างรวดเร็ว โดย ตัวอย่างเครื่องผลิตก๊าซจากหลักการดังกล่าว อยู่ในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้วิธีพลาสมาอาร์คโพลว์

ตัวอย่างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์โพลว์ประกอบไปด้วย ถังโลหะบรรจุ น้ำ และติดตั้งแท่งคาร์บอนสองแท่ง โดยแท่งคาร์บอนแอโนด (-) จะติดตั้งไว้ด้านล่าง และมีแท่งคาร์บอนขั้วแคโทด (+) ติดตั้งด้านบนซึ่งต่อมาจากภายนอกถึงความดัน ภายนอกถังจะมีตัวป้องกันแท่งคาร์บอนแอโนดให้ลงมาด้านล่างได้ ทั้งนี้การติดตั้งนั้นจะป้องกันไม่ให้แท่งคาร์บอนและสายไฟฟ้าสัมผัสกับถึงความดันส่วนที่เป็นโลหะ โดยต้องกันไว้ด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน นอกจากนี้จะต้องติดตั้งปั้มน้ำซึ่งลำเลียงน้ำจากบริเวณใต้ถังออกไปฉีดน้ำให้กับบริเวณการอาร์คระหว่างแท่งคาร์บอน ที่ได้รับกระแสไฟฟ้าจาก แหล่งกำเนิดที่ให้กระแสไฟฟ้าสูง ที่มีแรงดันกระแสตรง 25-35 โวลต์ และมีท่อที่ต่อออกไปจากด้านบนเพื่อที่จะนำก๊าซที่ผลิตได้ออกไปกักเก็บหรือใช้งานภายนอก

ในการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซนั้น จะตั้งค่าให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของแท่งคาร์บอนห่างกัน ในระยะประมาณรัศมีของแท่งคาร์บอน จากนั้นจะเปิดให้ปั้มน้ำทำงานซึ่งจะพ่นน้ำไประหว่างขั้วคาร์บอนทั้งสอง และเปิดเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขั้วคาร์บอน ขณะนี้ยังไม่มี การอาร์คเกิดขึ้นจนกว่าจะให้เครื่องป้องกันแท่งคาร์บอนขั้วแคโทดลงมาด้านล่างให้ใกล้กับกับแท่งคาร์บอนแอโนด จนกระทั่งเกิดการอาร์คขึ้น ในการอาร์คนี้อิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดจะวิ่งไปชนกับขั้วแคโทดด้านบน ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงประมาณ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นบริเวณปลายของแท่งคาร์บอนขั้วแคโทด จะมีความร้อนสูงมาก ทำให้คาร์บอนระเหิดเป็นไอ และป้องกันแท่งคาร์บอนขั้วแคโทดเข้าไปเพิ่ม โดยอัตราการป้อนนี้ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์คและขนาดของแท่งคาร์บอน รวมถึงอัตราการไหลของน้ำที่ฉีดไปยังบริเวณการอาร์ค ทั้งนี้ น้ำและก๊าซที่ออกจากจุดทำปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิสูง ทำให้น้ำในระบบมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติจำเป็นต้องติดตั้งระบบระบายความร้อนให้กับเครื่องผลิตก๊าซด้วย

ทั้งนี้ปริมาณของก๊าซที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าคาร์บอน ถ้าให้กำลังไฟฟ้าสูง ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ในระบบก็จะสูงขึ้นตาม ในการเพิ่มกำลังไฟฟ้านี้ จะต้องเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าแท่งคาร์บอน กำลังของปั้มน้ำ และขนาดของตัวระบายความร้อนด้วย โดยในการผลิตก๊าซนั้นจะต้องควบคุมตัวแปรในส่วนของ อัตราการป้อนแท่งคาร์บอน อุณหภูมิของน้ำในถัง ความดัน และอัตราการไหลของน้ำที่ลำเลียงไปยังจุดเกิดปฏิกิริยา เพื่อที่จะให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซ

2.2 คุณสมบัติของก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คได้น้ำ

จากการทดสอบคุณสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากการอาร์คได้น้ำของศาสตราจารย์ R. M. Santilli ด้วยวิธี PlasmArcFlow™ ในเบื้องต้นนั้นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ จากการวัดจะมีองค์ประกอบโดยประมาณของ H_2 50 % , CO 50 % และ CO_2 กับสารอื่น ๆ อีกในปริมาณน้อย

มาก ๆ อย่างไรก็ตามก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากวิธีพลาสมาอาร์คโพลว์ จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากโมเลกุลของ H_2 และ CO ทั่ว ๆ ไป ซึ่งพิสูจน์ได้จากการทดลองต่าง ๆ ดังนี้ [8]

1) ในการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ CO จะถูกเผาไหม้ และ oxidizes กลายเป็น CO_2 ทั้งนี้ก๊าซ CO มีปริมาณอยู่ 50 % ของก๊าซเชื้อเพลิงตั้งต้น ดังนั้นไอเสียที่ได้ควรจะมีปริมาณของ CO_2 ประมาณ 40% แต่จากการทดลองการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิง พบว่าไอเสียมีส่วนประกอบของ CO_2 เพียง 5% - 7%

2) ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของ H_2 50 % และ CO 50 % ควรจะมีค่าความจุพลังงาน 315 BTU/scf (standard cubic foot) ในขณะที่ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากการอาร์คได้น้ำนั้นสามารถนำมาใช้ตัดโลหะด้วยความเร็วสองเท่าของการตัดด้วยก๊าซ อะเซทิลีน (acetylene) ที่มีค่าความจุพลังงานอยู่ประมาณ 2,300 BTU/scf

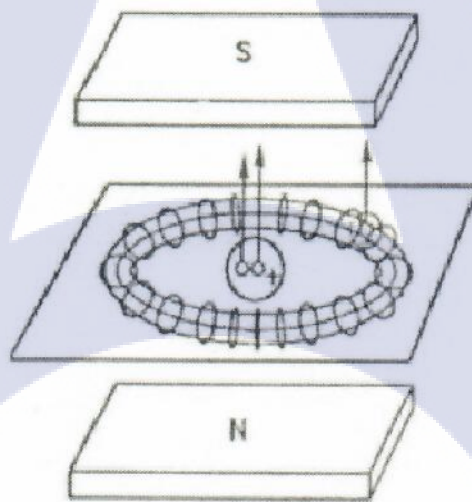
3) ในการรวมตัวกันของอะตอมไฮโดรเจน H ให้เป็น H_2 จะต้องคายความร้อนออกมา 110 Kcal/mole และการรวมตัวกันของคาร์บอน C กับออกซิเจน O ให้เป็น CO จะมีการคายความร้อน 255 Kcal/mole นำค่าความร้อนมาคำนวณตามหลักของเคมีควอนตัม (quantum chemistry) จะได้ผลลัพธ์ของความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาหลังจากการรวมตัวกันของอะตอม H C และ O เท่ากับ 2,250 BTU/scf แต่จากผลการวัดค่าความร้อนที่ได้จากเครื่องผลิตก๊าซขนาดเล็ก ที่ความดันบรรยากาศ ได้ค่าความร้อนเพียง 250 BTU/scf ซึ่งน้อยกว่า 10 เท่าจากการคำนวณด้วยหลักการ เคมีควอนตัม

4) เมื่อนำก๊าซเชื้อเพลิงมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) จากการสแกนพบว่าค่า peak ที่ปรากฏทั้งหมดนั้น มีมวลโมเลกุลรวมกันกว่า 1,000 a.m.u. ทั้งนี้ผลที่ได้ควรจะแสดงผลค่าค่า peak ของสาร CO_2 ที่มีมวลโมเลกุล 44 a.m.u. เพียงค่าเดียว

จากการทดลองข้างต้นเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นว่า การตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากการอาร์คได้น้ำนั้น มีความซับซ้อนเกินกว่าจะใช้วิธีตรวจสอบแบบพื้นฐานดังกล่าว ซึ่ง ศาสตราจารย์ Santilli ที่ Harvard University ได้ทำการวิจัยเพื่อจะอธิบายสารประกอบทางเคมีของก๊าซเชื้อเพลิงนี้ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 ด้วยการศึกษาทางระบบคณิตศาสตร์ ทฤษฎี และการทดลอง ที่ทำให้ได้ศาสตร์ใหม่ที่เรียกว่า Hadronic mechanics และ hadronic chemistry จนกระทั่งปัจจุบันการศึกษาก๊าซเชื้อเพลิงจากการอาร์คได้น้ำ ได้ประสบผลสำเร็จในการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงโมเลกุลของก๊าซ ซึ่งค้นพบว่าก๊าซที่ได้นั้นไม่ได้มีรูปแบบของโมเลกุลแบบทั่ว ๆ ไป แต่จะอยู่ในรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า Santilli magnequles [6] ซึ่งเรียกได้ว่าเป็น chemical species แบบใหม่ที่ตั้งชื่อตามผู้ค้นพบ

Santilli magnecules หรือ electromagnecule นี้ประกอบด้วย อะตอมเดี่ยว ๆ และ ส่วนประกอบของโมเลกุล ที่เรียกว่า radical หรือ dimers และ โมเลกุลอื่น ๆ ซึ่ง จะยึดกันด้วยพันธะ ภายในชนิดใหม่ โดยอะตอมจะมีโพลาไรเซชันแม่เหล็กของอิเล็กตรอนที่โคจรรูปร่าง ๆ และ โพลาไรเซชันแม่เหล็กจะเป็นส่วนหลักของพันธะ

ความต้องการพื้นฐานในการทำให้เกิด magnecule นั้นอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ อะตอม เมื่ออะตอมได้รับสนามแม่เหล็กความเข้มสูงจากภายนอก อิเล็กตรอนวงโคจรนอกสุดของ อะตอม จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทางได้ แต่จะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ ที่มีการ กระจายแบบทอรรอยด์ (toroidal) เป็นผลทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงแม่เหล็กชั่วขณะได้ เนื่องจากการ หมุนของประจุอิเล็กตรอนแบบทอรรอยด์ ทั้งนี้การกระจายของโมเมนต์ไดโพลจะมีการเรียงใน แกนสมมาตร และ โพลาไรซ์ แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีขั้วตรงข้ามกับขั้วแม่เหล็กภายนอก ดังรูป 2.3



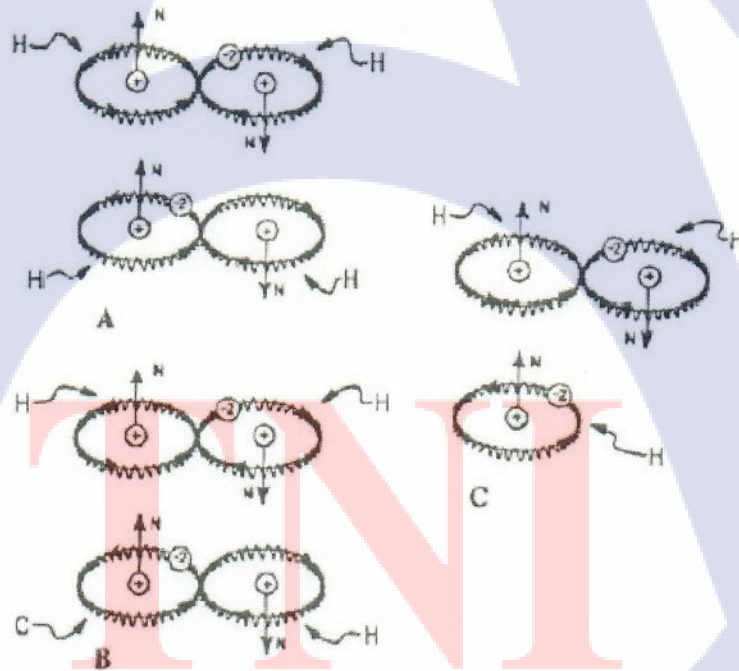
รูปที่ 2.3 วงโคจรของอิเล็กตรอนที่มีโพลาไรซ์แบบทอรรอยด์ เกิดขึ้นจากภายใต้ สนามแม่เหล็กความเข้มสูงจากภายนอก

เมื่อมีการอาร์คด้วยไฟฟ้าได้น้ำ โมเลกุลของน้ำจะแยกออกบางส่วนหรือทั้งหมด ในขณะที่ คาร์บอนที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าบวก จะระเหิดกลายเป็นไอ และพลาสมาที่มีอุณหภูมิประมาณ 770°C ส่วนใหญ่จะเป็นไอออนของอะตอม H, O และ C และ radicals เช่น CH และ HO ทั้งนี้อะตอม H, C, O และ radicals จะได้รับสนามแม่เหล็กความเข้มสูงจากการอาร์คไฟฟ้า ทำให้โพลาไรซ์ของ อิเล็กตรอนวงโคจรนอกสุดเป็นแบบทอรรอยด์ จากนั้นน้ำที่มีการล้าเลียงอย่างต่อเนื่องจะนำพลาสมา เคลื่อนที่ออกจากขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้แรงดึงดูดจากโพลาไรซ์แม่เหล็กนี้มีค่ามากพอที่จะทำให้โมเลกุลมี

ความเสถียรได้ และสรุปได้ว่าก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากการอาร์คได้น้ำจะมีองค์ประกอบอยู่ในรูปแบบของ Santilli magnequles ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของอะตอมและโมเลกุลดังนี้ [8]

- 1) อะตอมเดี่ยว ๆ H, O และ C
- 2) ส่วนประกอบของโมเลกุล (dimers or raicals) เช่น HO และ CH
- 3) โมเลกุลพันธะเวเลนซ์เดี่ยว C-O
- 4) โมเลกุลพันธะเวเลนซ์คู่ C=O และ H₂
- 6) โมเลกุลพันธะเวเลนซ์สาม CO และ H₂O

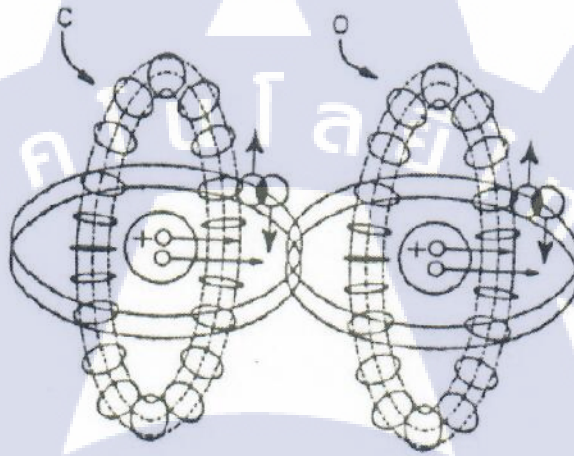
ทั้งนี้อิเล็กตรอนวงโคจรนอกสุดของ อะตอม radicals หรือ โมเลกุลต่าง ๆ จะมีโพลาไรซ์แบบทอรอยด์ และเกิดการยึดเหนี่ยวซึ่งและกันแบบห่วงโซ่ ด้วยพันธะที่มีโพลาไรซ์แม่เหล็กตรงกันข้ามกัน North-South-North-South-... และจะทำให้เกิดในการกำเนิดในรูปแบบแผนผังแบบแมกเนกุล (magnequles) ที่มีตัวอย่างดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแมกเนกุลพื้นฐาน ที่ประกอบด้วยโมเลกุลพันธะคู่ ยึดเหนี่ยวกับอะตอมเดี่ยวหรือโมเลกุลพันธะคู่ ด้วยสนามแม่เหล็กที่มีโพลาไรซ์ตรงข้ามกัน ที่เกิดจากวงโคจรอิเล็กตรอนที่มีโพลาไรซ์แบบทอรอยด์

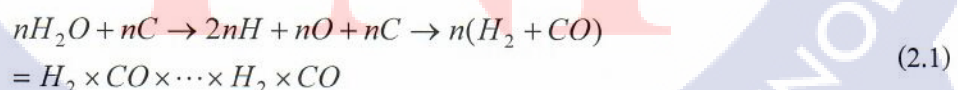
สังเกตได้ว่า โพลาริซ์แบบทอรอยด์ ของวงโคจรอิเล็กตรอนในอะตอม จะสร้างสนามแม่เหล็ก ที่ไม่สามารถตรวจพบได้จากวงโคจรอิเล็กตรอนในอะตอมทั่ว ๆ ไป และจากการคำนวณพื้นฐานพบว่าความเข้มของพันธะสนามแม่เหล็ก มีความเข้มมากกว่าสนามแม่เหล็กจากนิวเคลียสของโปรตอน 1,415 เท่า

สำหรับโมเลกุลของ CO ภายในระหว่างอะตอม C และ O จะมีแรงดึงดูดด้วยแรงแม่เหล็ก ความเข้มสูง ที่เกิดจากการโคจรของอิเล็กตรอนวงโคจรนอกสุด ที่มีการเคลื่อนที่แบบทอรอยด์ ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของ CO ที่ได้มาจากการอาร์คได้น้ำ อะตอม C และ O จะถูกยึดเหนี่ยวกันด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มสูงที่มีขั้วตรงกันข้าม จากวงโคจรของอิเล็กตรอนแบบทอรอยด์ แทนที่จะเป็นพันธะเวเลนซ์สามเหมือนโมเลกุล CO ทั่วไป

ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากการอาร์คได้น้ำนั้น ส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของโมเลกุล H_2 ประมาณ 50% และ CO 50% ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลในรูปแบบ magnecular สมการเคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการอาร์คได้น้ำสำหรับการผลิต H_2 และ CO เขียนได้ดังนี้ [5]



โดย n คือจำนวนของอะตอมหรือโมเลกุล และ “ $\times$ ” คือพันธะแม่เหล็ก ที่ทำให้เกิดการรวมตัวแบบ magnecule โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะแม่เหล็กจะน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุล H-H และ C=C

2.3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คได้น้ำ [6]

ในปฏิกิริยาอาร์คไฟฟ้าได้น้ำนั้น จะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำ และแท่งคาร์บอน ทำปฏิกิริยาให้เกิดก๊าซเชื้อเพลิง โดยมีความร้อนที่แผ่ออกมาด้วย ในการหาประสิทธิภาพของพลังงานในเชิงวิทยาศาสตร์ ตามหลักการของการอนุรักษ์พลังงาน สามารถหาค่าได้เป็น

$$\text{Scientific Energy} = \frac{\text{Total energy produced}}{\text{Total energy available}} = \frac{E_{\text{gas}} + E_{\text{heat}}}{E_{\text{electr}} + E_{\text{liq}}} < 1 \quad (2.2)$$

โดย E_{gas} เป็นพลังงานจากการเผาไหม้ก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้ ส่วน E_{heat} เป็นพลังงาน ความร้อนที่แผ่ออกมาสู่สิ่งแวดล้อมระหว่างการอาร์คได้น้ำ และ E_{electr} เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในการอาร์คได้น้ำ และ E_{liq} เป็นพลังงานของเหลวที่ถูกลำเลียงเข้าไปยังบริเวณการอาร์ค และขั้วไฟฟ้าคาร์บอน ทั้งนี้ Scientific Energy สมการที่ 2.2 จะมีค่าไม่มากกว่า 1 ตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาสมรรถนะของปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คได้น้ำ ที่จะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ จะไม่ใช่ Scientific Energy ตามสมการที่ 2.2 เนื่องจากของเหลวที่นำมาใช้ในการลำเลียงสู่บริเวณการอาร์คได้น้ำนั้น สามารถนำมาจาก น้ำทะเล น้ำเสีย หรือสารละลายน้ำมันที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้ต้นทุนสำหรับของเหลวและขั้วไฟฟ้าคาร์บอนมีราคาถูกมาก เมื่อเทียบกับต้นทุนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากอาร์คไฟฟ้าได้น้ำ ดังนั้นการประเมินสมรรถนะของปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คในกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ ในเชิงพาณิชย์ ถูกกำหนดให้เป็น ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance : COP) ที่เขียนได้ดังนี้

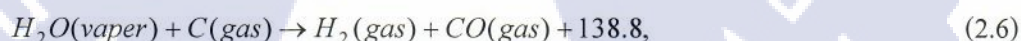
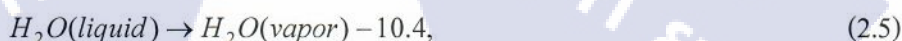
$$\text{Coefficient of Performance (COP)} = \frac{E_{\text{gas}} + E_{\text{heat}}}{E_{\text{electr}}} \quad (2.3)$$

และในกรณีที่ไม่นรวมผลผลิตที่ได้จากความร้อนที่แผ่ออกมาระหว่างการอาร์ค E_{heat} ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจะเปลี่ยนไปเป็น $\text{COP} = E_{\text{gas}} / E_{\text{electr}}$

เราสามารถคำนวณหาขีดจำกัดบนของ COP ได้ในทางทฤษฎีได้ ที่ยังไม่ได้คำนึงถึงกลไกของปฏิกิริยาในส่วนของ อุณหพลศาสตร์ กลศาสตร์ของไหล และ จลพลศาสตร์เคมี ในการคำนวณ โดยกำหนดให้ อุณหภูมิก่อนการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความดัน $P = 1\text{ atm}$ และแบ่งการคำนวณออกเป็นสองกรณี คือการใช้ น้ำเป็นของเหลวในการทำปฏิกิริยา และการใช้สารทำความเย็น (antifreeze) เป็นของเหลวในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะทำได้ ค่า COP ที่แตกต่างกัน

2.3.1 สัมประสิทธิ์สมรรถนะในกรณีที่ใช้น้ำเป็นของเหลว

ปฏิกิริยาเคมีจากการอาร์คได้นำที่ใช้การลำเลียงน้ำส่งผ่านไปยังบริเวณการอาร์คระหว่างแท่งคาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซที่มีองค์ประกอบของ H_2 และ CO ที่เป็นไปตามปฏิกิริยาดังนี้



ค่าพลังงานที่ใช้ในการคำนวณในหน่วย kcal/mol สมการที่ 2.6 ได้มาจากการคำนวณค่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม ในตาราง 2.1 และจากสมการ 2.4, 2.5 และ 2.6 เราสามารถจัดสมดุลสมการเคมีได้เป็น



จากสมการ 2.7 เป็นปฏิกิริยาจากการอาร์คได้นำทำให้ได้ก๊าซ H_2 และ CO เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic reaction) 49.3 kcal/mole

ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม (kcal/mol. $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Diatomic molecules		Diatomic molecules	
H-H	104.2	C=O	255.8
O=O	119.1	N≡N	192.0
Manyatomic molecules		Manyatomic molecules	
C-O	85.5	O-H	110.6
C=O in CO_2	192.0	O-O	35

จากตาราง 2.2 ในกรณีที่ให้พลังงานเข้าไปในระบบของปฏิกิริยาเคมีในสมการ 2.7 เท่ากับ
1 kW.h = 860 kcal สามารถผลิตไฮโดรเจนได้

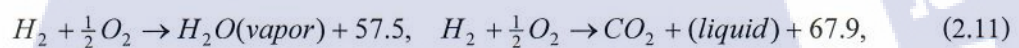
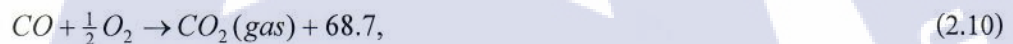
$$\begin{aligned} H_2 (\text{mole}) &= 860 (\text{kcal}) / 43.9 (\text{kcal/mol}) \\ &= 19.6 \text{ moles} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ที่ความดัน 1 atm และอุณหภูมิ 25 C° จะได้ไฮโดรเจนที่มีปริมาตรเท่ากับ

$$\begin{aligned} H_2 (\text{Volume}) &= 19.6 (\text{mole}) \times 22.41 (\text{liter/mole}) \\ &= 493.1 \text{ liter} \end{aligned} \quad (2.9)$$

จากตาราง 2.2 1 cf = 28.317 liters ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่ได้เท่ากับ 493.3 / 28.317 = 15.5 cf
ปริมาตรของก๊าซ CO ในสมการ 2.7 จะมีปริมาตรเท่ากับ 15.5 cf เช่นเดียวกับก๊าซไฮโดรเจน

ในการเผาไหม้ของก๊าซ H_2 และ CO นั้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction)
ตามสมการดังนี้



ตารางที่ 2.2 การแปลงหน่วยพลังงานและปริมาตร

1 kcal	= 3.9685	BTU
1 kcal	= 1.1628×10^{-3}	kW.h
1 BTU	= 0.25198	kcal
1 BTU	= 2.930×10^{-4}	kW.h
1 kW.h	= 3413.0	BTU
1 kW.h	= 859.99	kcal
1 m ³	= 35.314	cf
1 cf	= 28.317	liters

เราสามารถหาปริมาณความจุพลังงาน (energy content) หรือค่าความร้อนสุทธิ ของส่วนผสมก๊าซ $H_2 + CO$ ในกรณีที่ส่วนผสมก๊าซอัตราส่วน 50% +50% ตามสมการ 2.13 จะคายพลังงานความร้อนออกมาเท่ากับ $136.6 / 2 = 68.3 \text{ kcal/mol} = 271.2 \text{ BTU/mol} = 342.8 \text{ BTU/cf}$

ปฏิกิริยาในสมการ 2.12 และ 2.13 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่มี ไอน้ำ และน้ำ ออกมาตามลำดับ ในกรณีที่ใช้ก๊าซ H_2 และ CO ปริมาณ 19.6 โมล จากสมการ 2.12 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ให้ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะคายความร้อนออกมาเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Exothermic heat (vapor)} &= 19.6 (\text{mole}) \times 126.2 \\ &= 2473.5 \text{ kcal หรือ } 2.88 \text{ kW.h} \end{aligned} \quad (2.14)$$

ในกรณีของปฏิกิริยาการเผาไหม้ ที่ได้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา จากสมการ 2.13 เกิดการคายความร้อนออกมาเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Exothermic heat (liquid)} &= 19.6 (\text{mole}) \times 136.6 \\ &= 2677.4 \text{ BTU/mole หรือ } 3.11 \text{ kW.h} \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากปฏิกิริยาในการเผาไหม้ H_2 และ CO ที่คายความร้อนออกมาในสมการ 2.14 และ 2.15 คือค่าความจุพลังงาน (energy content) ของก๊าซสังเคราะห์ กรณีที่การเผาไหม้ได้น้ำ จะมีค่าความจุพลังงานมากกว่ากรณีที่ได้น้ำ

ดังนั้นเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุด สำหรับปฏิกิริยาพลาสมาอาร์ค ที่เป็นไปได้ในทางทฤษฎี โดยใช้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ก๊าซ H_2 และ CO อย่างละ 19.6 โมล ในกรณีที่ได้น้ำ มีความร้อนออกมาในปริมาณ 2.88 kW.h และในกรณีที่ได้น้ำมีความร้อนออกมาปริมาณ 3.11 kW.h และทั้งสองกรณีนี้จะต้องใช้พลังงานจำนวน 1 kW.h ในการได้มาของ H_2 และ CO อย่างละ 19.6 โมล ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุดในทางทฤษฎี (ไม่รวมผลผลิตที่เป็นพลังงานความร้อนที่ได้ E_{heat}) คือกรณีที่เผาไหม้ก๊าซ H_2 และ CO ได้น้ำออกมา มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Coefficient of Performance} &= E_{\text{gas}} / E_{\text{electr}} \\ &= E_{\text{gas}} / E_{\text{endot}} \\ &= 3.11 \text{ kW.h} / 1 \text{ kW.h} \\ &= 3.11 \end{aligned} \quad (2.16)$$

E_{endot} เป็นพลังงานที่ต้องใช้ไปสำหรับทำปฏิกิริยาอาร์คได้น้ำทำให้เกิดก๊าซ H_2 และ CO ในสมการ 2.7 ที่ได้มาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์คได้น้ำ

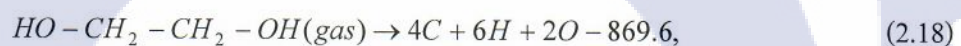
อย่างไรก็ตามพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในการอาร์ค จะแยกเป็นสองส่วนคือพลังงานที่ใช้ไป การทำให้เกิดก๊าซสังเคราะห์และพลังงานความร้อนที่แผ่ออกมา E_{heat} ดังนั้นจากสมการ 2.16 ที่เป็น จี๊ดจำกัดบนของสัมประสิทธิ์สมรรถนะ จะทำให้ได้สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปฏิกิริยาเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Coefficient of Performance} &= E_{\text{gas}} / E_{\text{electr}} \\ &= E_{\text{gas}} / (E_{\text{endot}} + E_{\text{heat}}) \\ &= 3.11 \cdot k \end{aligned} \quad (2.17)$$

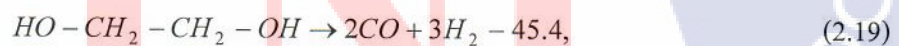
ค่า k เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนตามปริมาณความร้อนที่แผ่ออกมาจากการอาร์คได้น้ำโดยที่ $k < 1$

2.3.2 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ใช้สารหล่อเย็นเป็นของเหลว

ในกรณีนี้จะให้ของเหลวเป็นสารหล่อเย็น ที่มีส่วนประกอบของเอทิลีนไกลคอล (ethyleneglicole) เราจะได้สมการในขั้นตอนแรกของการเกิดปฏิกิริยาในการอาร์ค ที่ไม่คำนึงถึง ความร้อนที่ทำให้เอทิลีนไกลคอลระเหย และผลกระทบของสารละลาย เขียนได้ดังนี้

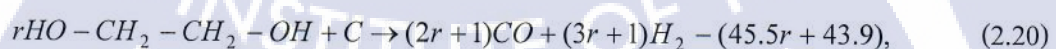


และผลต่อเนื่องที่ตามมาจะได้ $2CO$ และ H_2 เป็นไปตามสมการ



จากสมการ 2.19 เราจะได้ 2 โมลของ CO และ 3 โมลของ H_2

สำหรับการทำปฏิกิริยาในกระบวนการลำเลียงสารทำความเย็นผ่านการอาร์คระหว่างแท่ง คาร์บอน จากสมการ 2.19 เราจะได้ปฏิกิริยาเคมีที่เป็นไปตามสมการดังนี้



โดยตัวแปร r เป็นค่าความสัมพันธ์การใช้หมดไปของสารตั้งต้น ระหว่าง เอทิลีน ไกลคอล กับ แท่งคาร์บอน

ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.20 เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน $45.5r + 43.9$ kcal ถ้าเราให้พลังงานเข้าไปในปฏิกิริยา 2.20 ในปริมาณ 1 kW.h ซึ่งมีค่าเท่ากับ 680 kcal จะได้จำนวนโมลของ CO เท่ากับ $(2r + 1) \cdot 680 / (45.5r + 43.9)$ โมล และ H_2 $(3r + 1) \cdot 680 / (45.5r + 43.9)$ โมล ดังนั้น สมการ 2.10 และ 2.11 เราจะได้ค่าพลังงานจากการเผาไหม้ CO และ H_2 ที่ได้มาจากการใช้พลังงาน 1 kW.h ในปฏิกิริยาดังนี้

$$\text{total combustion energy} = \frac{680}{45.5r + 43.9} ((2r + 1) \cdot 68.7 + (3r + 1) \cdot 67.9) \text{ kcal} \quad (2.21)$$

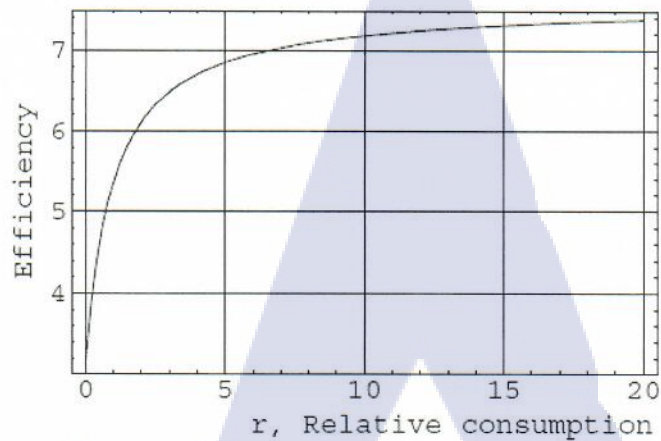
จากสมการ 2.21 จะได้ E_{gas} ทำให้เราสามารถหาขีดจำกัดบนของสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Maximum COP} &= E_{\text{gas}} / E_{\text{endot}} \\ &= \frac{1}{45.5r + 43.9} ((2r + 1) \cdot 68.7 + (3r + 1) \cdot 67.9) \end{aligned} \quad (2.22)$$

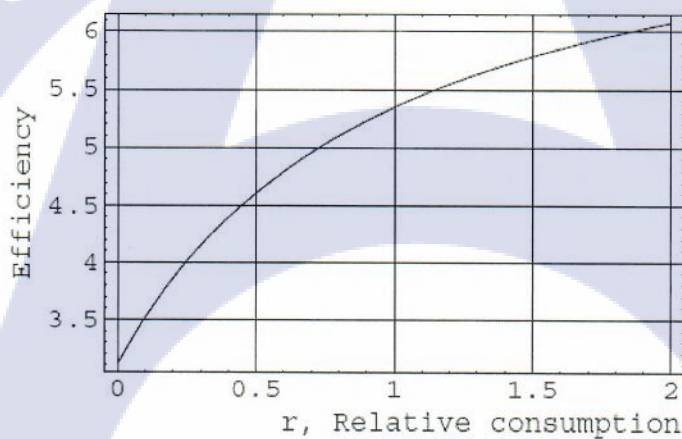
เมื่อ $r = 0$ เราจะพบว่าขีดจำกัดบนของสัมประสิทธิ์สมรรถนะได้เท่ากับ 3.11 เท่ากับขีดจำกัดบนในสมการ 2.16 ที่ใช้น้ำเป็นของเหลวในการทำปฏิกิริยา และเมื่อเราให้ $r \rightarrow \infty$ จากสมการ 2.22 จะได้

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{45.5r + 43.9} ((2r + 1) \cdot 68.7 + (3r + 1) \cdot 67.9) \right] = 7.51 \quad (2.23)$$

จากสมการ 2.22 และ 2.23 เราพบว่าค่าขีดจำกัดของประสิทธิภาพเชิงพลังงานจะอยู่ในช่วง 3.11 ถึง 7.51 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าตัวแปร r ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึง ∞ โดยรูปที่ 2.6 และ 2.7 เป็นค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในสมการ 2.23 เปรียบเทียบกับฟังก์ชันของตัวแปร r อย่างไรก็ตามในการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์ค นั้น พลังงานไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในการอาร์คไฟฟ้าจะปล่อยความร้อนออกมาด้วยจึงทำให้ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นนั้นจะน้อยกว่าในสมการ 2.23 โดยจะขึ้นอยู่กับค่า k ทั้งนี้การปลดปล่อยความร้อนออกมามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบตัวทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในทางทฤษฎี ของตัวปฏิกรณ์ พลาสมาอาร์คโพลาร์ ในฟังก์ชัน ความสัมพันธ์การใช้หมดไปของสารตั้งต้น r ระหว่าง เอทิลีนไกลคอล กับ แท่งคาร์บอน โดย $0 \leq r \leq 20$



รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในทางทฤษฎี ของตัวปฏิกรณ์ พลาสมาอาร์คโพลาร์ ในฟังก์ชัน ความสัมพันธ์การใช้หมดไปของสารตั้งต้น r ระหว่าง เอทิลีนไกลคอล กับ แท่งคาร์บอน โดย $0 \leq r \leq 2$

นอกจากนี้ตัวแปร r ที่เป็นตัวการถูกใช้ไปของ เอทิลีนไกลคอล กับแท่งคาร์บอน ต่อ การให้พลังงานไฟฟ้า 1 kW.h เมื่อมีค่าสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยของกระบวนการทำปฏิกิริยาในตัวทำปฏิกิริยา คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา ปริมาตรของขอบเขตปฏิกิริยา อัตราของสารตั้งต้น เอทิลีนไกลคอล น้ำ ก๊าซ และ แท่งคาร์บอน อัตราของการเคลื่อนย้าย CO และ H_2 ออกไป และอัตราส่วนผสม เป็นต้น โดย

- อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจะอยู่กับ ความดันและอุณหภูมิ
- ปริมาตรของขอบเขตปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับ ขนาดของพลาสมาอาร์ค และบริเวณที่มีส่วนประกอบของ ความร้อนสูง
- อัตราของสารตั้งต้นที่เข้ามา และอัตราของการเคลื่อนย้ายก๊าซออกไป ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้ แท่งคาร์บอน โครงสร้างทางเรขาคณิต ความดันและความเร็วของเหลว

2.4 ทฤษฎีการดิสชาร์จไฟฟ้าในฉนวนเหลว

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงถึงการเกิดการดิสชาร์จในเหลว และความคงทนต่อแรงดันของฉนวนเหลว เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบการอาร์คไฟฟ้าได้ของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำมัน เพื่อให้กระบวนการผลิตก๊าซมีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมการอาร์คไฟฟ้าให้มีความต่อเนื่องได้

2.4.1 คุณสมบัติของฉนวนเหลว [9]

ฉนวนเหลวจะมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลพอ ๆ กับขนาดของโมเลกุล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุลของก๊าซแล้วจะสั้นกว่ามาก ดังนั้นระยะทางอิสระที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้จึงสั้นมาก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีน้อย ใน การที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนจึงต้องใช้ไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นมาก ๆ

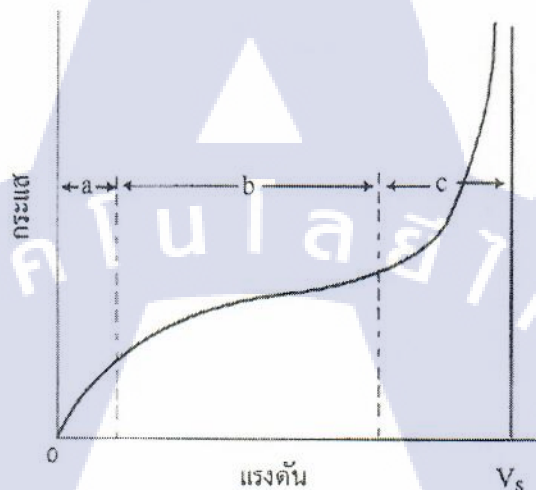
เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับฉนวนเหลว ฉนวนเหลวบางชนิดเกิดการแตกตัวเป็นไอออน และเคลื่อนไปตามแรงของสนามไฟฟ้าเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ฉนวนเหลวบางชนิดจะเกิด ฟองอากาศเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหล และเกิดการดิสชาร์จในฟองอากาศขึ้น ทำให้เกิดการเบรค ดาวน์ของฉนวนเหลวตามมา

ฉนวนเหลวจะแตกต่างกับฉนวนแข็งที่โมเลกุลหรืออะตอมของฉนวนเหลว ไม่ได้ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันอย่างแน่นหนาเหมือนกับโมเลกุลหรืออะตอมของฉนวนแข็ง โมเลกุลของฉนวนเหลวสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระพอสมควร อนุภาคไฟฟ้าก็สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าฉนวนแข็ง เมื่ออนุภาคไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปจะทำให้เกิดการไหลของฉนวนเหลวขึ้น

ฉนวนเหลวที่บริสุทธิ์นั้นหาได้ยากเช่นเดียวกับก๊าซบริสุทธิ์ ส่วนใหญ่แล้วในฉนวนเหลวจะมีสิ่งเจือปนอยู่ไม่มากนัก ซึ่งมีส่วนต่อแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว เช่น น้ำมันหม้อแปลง ดังนั้น จึงต้องให้ความสำคัญกับผลของสิ่งเจือปนเป็นอย่างมาก

2.4.2 การนำไฟฟ้าของฉนวนเหลว [9]

ถ้าให้ฉนวนเหลวอยู่ระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าระนาบขนาน แล้วป้อนแรงดันเข้าไปเหมือนกับกรณีของก๊าซ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

จากรูปที่ 2.8 เราสามารถแบ่งความสัมพันธ์ออกเป็น 3 บริเวณ คือ

บริเวณ a เป็นบริเวณที่กระแสแปรผันตามแรงดันตามกฎของโอห์ม ค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวนเหลวจะวัดในบริเวณนี้

บริเวณ b เป็นบริเวณที่กระแสมีแนวโน้มที่จะอิ่มตัวในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้น แต่ในฉนวนบางชนิดจะไม่ปรากฏแนวโน้มอิ่มตัวในลักษณะเช่นนี้ ทั้งนี้ ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนเหลวและเงื่อนไขการทดลองด้วย

บริเวณ c เป็นบริเวณที่กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแรงดันเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การเบรคดาวน์ในที่สุด

เราเรียกการนำไฟฟ้าในบริเวณ c นี้ว่า การนำไฟฟ้าสนามไฟฟ้าสูง ในขณะที่การนำไฟฟ้าในบริเวณ a,b จะเรียกว่า การนำไฟฟ้าสนามไฟฟ้าต่ำ

ในกรณีของการนำไฟฟ้าสามไฟฟ้าต่ำนั้นจะคล้ายคลึงกับกรณีของก๊าซ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในบริเวณ a จะเป็นกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออน เมื่อแรงดันสูงขึ้น กระแสนี้จะถูกจำกัดโดยปริมาณปริมาณไอออนที่เกิดขึ้น ซึ่งตรงกับบริเวณ b ในรูป ไอออนที่เกิดขึ้นเองนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ หรือเกิดจากการแยกตัว

เป็นไอออนเนื่องจากสารไม่บริสุทธิ์ที่เจือปนอยู่ หรือไม่เกิดอนุภาคไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณผิวของ ขั้วไฟฟ้ากับฉนวนเหลว

ในบริเวณของการนำไฟฟ้าสนามไฟฟ้าสูงนั้น เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จะเกิด อนุภาคไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมากมาด้วยกลไกต่างๆ ดังนี้

- 1) การแยกตัว เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ฉนวนเหลวจะแยกตัวออกเป็นไอออนอย่างรวดเร็ว
- 2) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้า เมื่อขั้วไฟฟ้ามีสนามไฟฟ้าสูงขึ้นจะเกิดการ ปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากขั้วไฟฟ้าด้วยสนามไฟฟ้า หรือโดย Schottky Effect ซึ่งหมายถึง จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้าด้วยความร้อนจะมี ปริมาณมากขึ้น ถ้าถูกกระทำด้วยสนามไฟฟ้าสูงๆ เช่น ถ้าสนามไฟฟ้าสูงกว่า 100 kV/cm ค่า Work Function ซึ่งหมายถึงพลังงานที่จำเป็นในการปล่อยอิเล็กตรอนออก จากขั้วไฟฟ้านี้จะลดลง แม้แต่อุณหภูมิห้องก็ยังสามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดจาก ขั้วไฟฟ้าด้วยความร้อนได้
- 3) การแตกตัวโดยการชน อิเล็กตรอน จะถูกเร่งในสนามไฟฟ้าไปชนกับโมเลกุลของ ฉนวนเหลวจนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้น ซึ่งคล้ายกับกระบวนการในเรื่องการ ดิสชาร์จของก๊าซ เมื่ออิเล็กตรอนซึ่งถูกปล่อยออกจากขั้วไฟฟ้าโดยสนามไฟฟ้า หรือ โดย Schottky Effect แล้วเคลื่อนที่ข้ามช่องแก็ป (Gap) ไปเป็นระยะทาง d ก็จะมีการ แตกตัวอย่างต่อเนื่องเพิ่มขึ้นเป็น $\exp(\alpha d)$ เท่า แต่จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 2.4.1 แล้ว ว่า การเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนกันในฉนวนเหลวนั้นเกิดขึ้นได้ยากกว่า ในก๊าซมาก ประมาณกันว่าจะต้องให้สนามไฟฟ้าสูงถึง 1 MV/cm จึงจะทำให้เกิดการ แตกตัวเป็นไอออนด้วยการชนได้

2.4.3 กลไกการเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว [9]

ในบริเวณความนำไฟฟ้าสนามไฟฟ้าสูง เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น จะเกิดการเบรคดาวน์ขึ้น ซึ่งมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายกลไกของการเกิดการเบรคดาวน์อยู่ 2 ทฤษฎี คือ

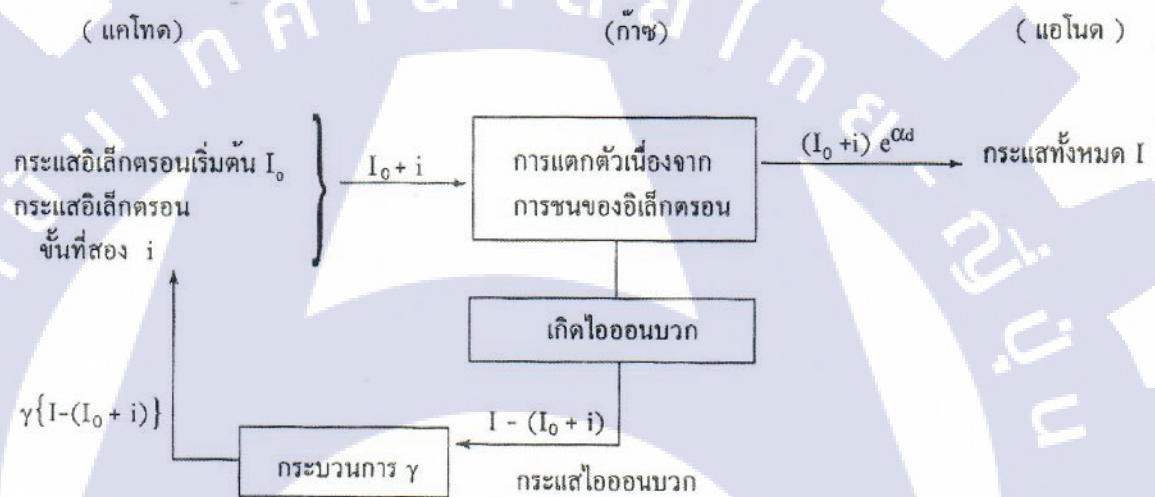
1) ทฤษฎีการเบรคดาวน์โดยอิเล็กตรอน

กล่าวคือ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากขั้วลบเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง และจะถูก เร่งให้ไปชนกับโมเลกุลของของเหลว เกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้น อิเล็กตรอนจะเพิ่มมากขึ้นเป็น ทวีคูณเรื่อยๆ ส่วนไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะทำให้สนามไฟฟ้าตรงบริเวณขั้วลบมีความเข้มสูงขึ้น

อิเล็กตรอนจะหลุดออกมามากขึ้นจนเกิดการเบรคดาวน์ ซึ่งคล้ายกับกลไก α และกลไก γ ในทฤษฎีของ Townsend ที่ใช้อธิบายการเบรคดาวน์ในก๊าซ

ทฤษฎีของ Townsend มาจากผลการทดลองของ Townsend เมื่อ E/p มีค่ามากขึ้น I จะมีค่าสูงมากขึ้น และเมื่อถึงแรงดันที่ค่าหนึ่ง จะเริ่มเกิดการดิซซาร์จอย่างต่อเนื่องได้เอง แม้ว่าเราจะแสงอัลตราไวโอเลตออกไปแล้วก็ตาม

Townsend ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์อันนี้ไว้ดังนี้คือ ไอออนบวกอันเกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนโดยกลไก α จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ เมื่อชนเข้ากับแผ่นขั้วลบ จะทำให้อิเล็กตรอนจากขั้วลบกระเด็นออกมาซึ่งเรียกกลไกอันนี้ว่า กลไก γ (แกมมา) อิเล็กตรอนที่เกิดจากกลไก γ นี้จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้นอีกได้ด้วยกลไก α ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ทฤษฎีของ Townsend

เมื่อลองคำนวณหาเงื่อนไขการเกิดสปาร์กแล้วจะได้ผลดังนี้คือ จากรูปที่ 2.9 กระแสอิเล็กตรอนเริ่มต้น I_0 ที่เกิดจากแสงอัลตราไวโอเลต และกระแสอิเล็กตรอนขั้นที่ 2 (i) ที่เกิดจากกลไก γ รวมกันจะเป็นกระแส $(I_0 + i)$ กระแสอิเล็กตรอนนี้จะก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนด้วยกลไก α เมื่อถึงขั้วบวก กระแสอิเล็กตรอนจะเพิ่มเป็น $I = (I_0 + i)e^{\alpha d}$ ส่วนทางด้านขั้วลบจะมีกระแสไอออนบวกไหลเข้าไปเป็นจำนวน $I - (I_0 + i)$ สมมติว่าไอออนบวก 1 ตัว ก่อให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้น γ ตัว จะได้กระแสอิเล็กตรอนขั้นที่สอง, $i = \gamma \cdot (I - (I_0 + i))$ จากสมการทั้ง 2 ข้างบน เมื่อจัด i ออกไปแล้วจะได้

$$I = \left(\frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \right) I_0 \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) สามารถกล่าวได้ว่า ในขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าไม่สูงนัก $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \ll 1$ เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ กระแสจะมีค่าเป็นอินฟินิตี้ (Infinity) เราเรียกเงื่อนไขนี้ว่า เงื่อนไขการเบรกดาวนซ์ของ Townsend

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.25)$$

และในขณะที่ $\gamma(e^{\alpha d} - 1) < 1$ จากสมการที่ (2.24) กระแส I จะแปรผันตาม I_0 เมื่อใดที่กระแส I_0 ถูกตัดขาดไป เมื่อนั้นกระแส I ก็จะหมดไป เราเรียกการคายประจุในบริเวณนี้ว่า การคายประจุแบบประทุงตัวเองไม่ได้ (Non self-sustained Discharge)

เมื่อลองพิจารณาเงื่อนไขการเกิดสปาร์กของ Townsend ในอีกด้านหนึ่ง จะสามารถอธิบายได้ผลดังนี้คือ ครั้งแรกอิเล็กตรอน 1 ตัว เริ่มต้นออกจากขั้วลบวิ่งไปสูขั้วบวก อิเล็กตรอนนี้จะก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้นระหว่างทางเป็นกลุ่มอิเล็กตรอน เรียกว่า อิเล็กตรอนอะวาลันซ์ (Electron Avalance) เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนนี้ถึงขั้วบวก จะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด $e^{\alpha d}$ ตัว และไอออนบวกที่เกิดขึ้นระหว่างทางจำนวน $(e^{\alpha d} - 1)$ จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ เมื่อชนเข้ากับแผ่นขั้วลบ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้น $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนขั้นที่ 2 จากขั้วลบนี้จะก่อให้เกิดกลุ่มอิเล็กตรอนขึ้นอีกเหมือนอิเล็กตรอนตัวแรก ดังนั้น ถ้า $\gamma(e^{\alpha d} - 1) < 1$ ก็จะไม่สามารถก่อให้เกิดกลุ่มอิเล็กตรอนขึ้นอีกต่อไปได้ กระแสก็จะไม่ต่อเนื่อง แต่ถ้า $\gamma(e^{\alpha d} - 1) > 1$ กลุ่มอิเล็กตรอนขั้นที่ 2 ที่เกิดขึ้นตามๆ กันมาจะมากขึ้นเรื่อยๆ กระแสจะเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ จนในที่สุดเกิดการสปาร์กขึ้น กล่าวคือ สมการที่ (2.25) เป็นเงื่อนไขที่จะกำหนดว่ากลุ่มอิเล็กตรอนจะดับสูญไปหรือว่าจะเพิ่มจำนวนขึ้น ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขของการเกิดสปาร์กแล้ว อิเล็กตรอนตัวแรกเพียงตัวเดียวก็จะก่อให้เกิดการเบรกดาวนซ์ได้ แม้ว่าในภายหลังจะไม่มีอิเล็กตรอนจากภายนอกคอยป้อนก็ตาม เราเรียกการคายประจุชนิดนี้ว่า การคายประจุแบบประทุงตัวเองได้ (Self-sustained Discharge)

2) ทฤษฎีเบรคดาวน์โดยฟองก๊าซ

กล่าวคือ เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จะเกิดฟองก๊าซขึ้นในของเหลวด้วยกลไกต่างๆ เมื่อฟองก๊าซโตขึ้นจะเกิดการฉีกขาดในฟองก๊าซขึ้นก่อน ซึ่งนำไปสู่การเบรคดาวน์ในฉนวนเหลวในที่สุด

ฟองก๊าซในฉนวนเหลวนั้น เกิดขึ้นได้ด้วยกลไกต่างๆ ดังนี้

- ความร้อนจากกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะทำให้ของเหลวระเหยกลายเป็นฟองก๊าซ
- โดยการชนของอิเล็กตรอน ทำให้โมเลกุลของเหลวแยกตัวแล้วเกิดเป็นก๊าซ
- ก๊าซที่ซึมอยู่ในผิวของขั้วไฟฟ้าจะหลุดออกมาเนื่องจากแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้น ถ้าเป็นแรงดันกระแสตรงหรือกระแสสลับซึ่งมีแรงดันไม่สูงนักแต่กระทำเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์โดยอิเล็กตรอนนั้น แม้ว่าในขณะที่กระแสไหลเพิ่มมากขึ้นจะมีฟองก๊าซเกิดขึ้นด้วยก็ตามแต่ก็ไม่ถือว่าเป็นการเบรคดาวน์โดยฟองก๊าซ จุดที่แสดงความแตกต่างระหว่างทฤษฎีทั้งสองนี้อยู่ที่ว่า จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในฉนวนเหลวหรือไม่เท่านั้น

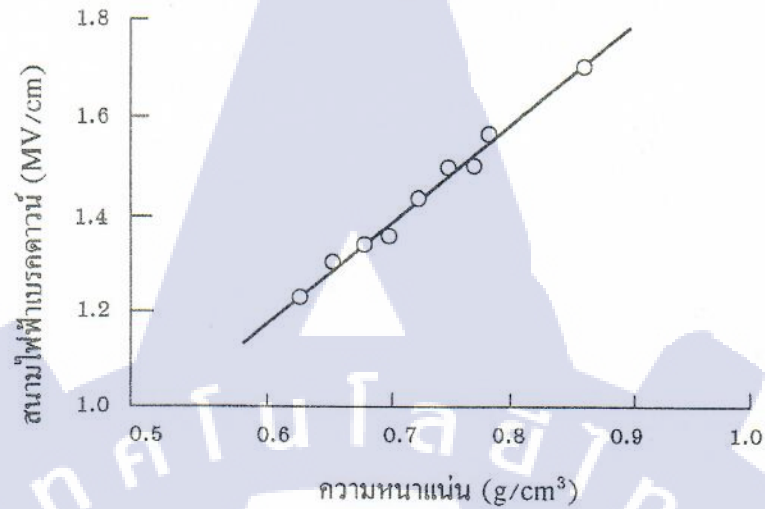
2.4.4 แรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลว [9]

1) สารไดอิเล็กตรอนเหลวบริสุทธิ์

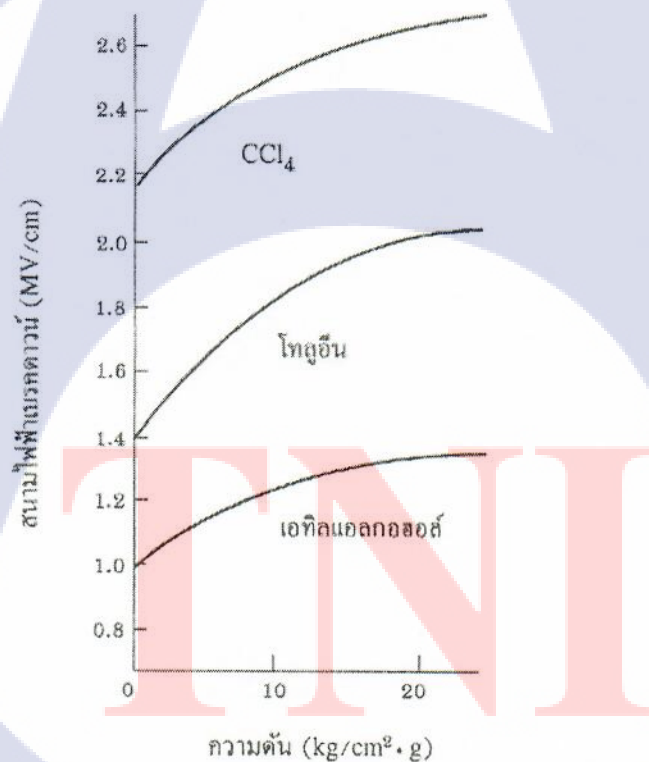
ฉนวนเหลวที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกัน จะมีค่าแรงดันเบรคดาวน์เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงความเข้มของสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวในตระกูลไฮโดรคาร์บอน โดยการป้อนแรงดันรูป Square Wave เป็นระยะเวลา $18 \mu\text{s}$ ความเข้มสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ จะเรียงรายกันเป็นเส้นตรงตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเบรคดาวน์โดยอิเล็กตรอนสั่นลง จึงเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนได้ยาก โมเลกุลจะใหญ่ขึ้น ทำให้ระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนสั่นลง จึงเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนได้ยาก

นอกจากนี้ถ้าเพิ่มความดันให้กับฉนวนเหลว สนามไฟฟ้าเบรคดาวน์จะมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเบรคดาวน์ด้วยฟองก๊าซ ในรูปที่ 2.11 นั้น แม้ว่าแรงดันรูป Square

Wave ที่ใช้จะมีช่วงเวลาสั้นมากเป็น $4.5 \mu\text{s}$ เท่ากันก็ตาม แต่จะเห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการเบรคความถี่จะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นและสนามไฟฟ้าเบรคความถี่ของของเหลว



รูปที่ 2.11 ความดันและสนามไฟฟ้าเบรคความถี่ของของเหลว

2) น้ำมันฉนวน (Insulation Oil)

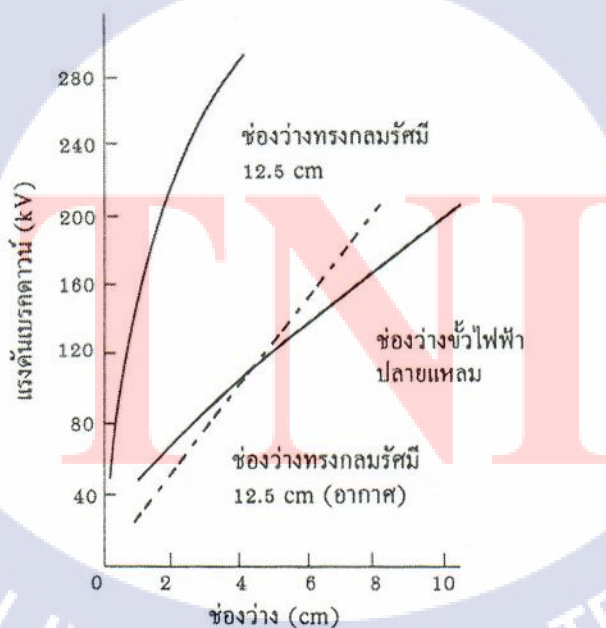
ที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วนั้น เป็นการอธิบายถึงคุณสมบัติของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ที่ได้จากการทดลองโดยพยายามไม่ให้มีสิ่งเจือปนเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่น้ำมันฉนวนที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัติ นั้นจะมีสิ่งเจือปน เช่น หยดน้ำ เส้นใย และก๊าซต่างๆ เจือปนอยู่ไม่น้อย ทำให้มีผลต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์เป็นอย่างมาก

น้ำมันฉนวนจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันจากธรรมชาติ (Mineral Oil) (ซึ่งใช้ในหม้อแปลงเซอร์กิตเบรค-เกอร์ คาปาซิเตอร์ และเคเบิล) และน้ำมันสังเคราะห์ (เช่น น้ำมันอัลคิลเบนซีน น้ำมันซิลิโคน เป็นต้น)

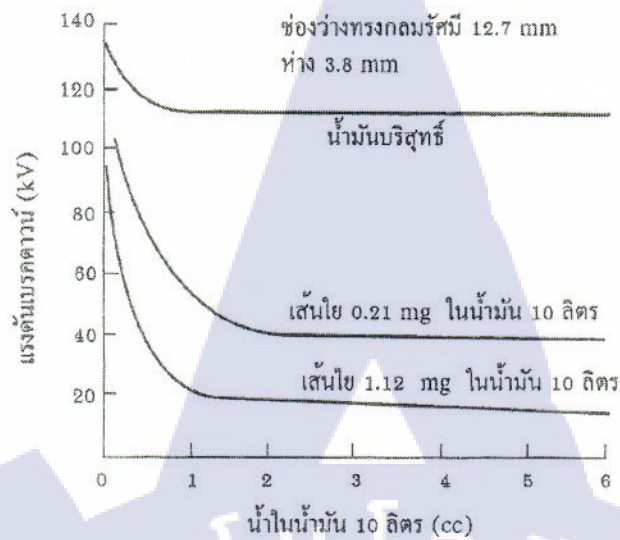
• แรงดันเบรคดาวน์

แรงดันที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในน้ำมันฉนวน จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสารเจือปน ที่มีอยู่ในน้ำมัน แต่ในทางกลับกัน เราสามารถทำนายความบริสุทธิ์ของน้ำมันฉนวนได้โดยแรงดันเบรคดาวน์ ในการวัดค่าแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันนั้น จะใช้ขั้วไฟฟ้าทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 mm วางห่างกัน 2.5 mm ซึ่งมาตรฐานกำหนดไว้ว่าจะต้องทนแรงดันกระแสสลับได้มากกว่า 30 kV (ค่า rms)

รูปที่ 3.4 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของกระแสสลับในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับอากาศจะเห็นว่ามีความไวต่อสิ่งเจือปนเมื่อช่องว่างแคบมีระยะห่างมากขึ้น



รูปที่ 2.12 แรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง



รูปที่ 2.13 ผลของหยดน้ำและเส้นใย

ถ้ามีน้ำเจือปนอยู่ในน้ำมันฉนวน (แม้ว่าจะเพียงเล็กน้อยก็ตาม) จะมีผลให้แรงดันเบรคความลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีทั้งน้ำและเส้นใยปนอยู่ร่วมกัน ปรากฏการณ์นี้จะยิ่งรุนแรงมากขึ้นดังรูปที่ 2.13

โดยทั่วไปแล้ว น้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์จะสามารถทนแรงดันเบรคความได้มากกว่า 50 kV (ค่ายอด) ที่ช่องว่างทรงกลมมาตรฐานในการทดสอบ หรือที่ความเข้มของสนามไฟฟ้ามากกว่า $50/0.25 = 200 \text{ kV/cm}$ เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศซึ่งมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเบรคความเท่ากับ 30 kV/cm แล้ว จะเห็นว่าน้ำมันหม้อแปลงสามารถทนต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเบรคความได้มากกว่าอากาศประมาณ 7 เท่า

จากรูปที่ 2.13 ระยะห่างของแท่งเท่ากับ 3.8 mm ปริมาณน้ำ 1 cc จะเท่ากับ 100 ppm ของน้ำมันหม้อแปลง 10 ลิตร ที่ปริมาณน้ำ 100 ppm แรงดันเบรคความจะลดลงจากเดิมมาก หลังจากนั้น แม้ปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แรงดันเบรคความจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ถ้าในน้ำมันฉนวนนั้นมีเส้นใยอยู่ด้วย (แม้เพียงเล็กน้อย) แรงดันเบรคความก็จะลดลงอย่างมาก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่ามีค่าไดอิเล็กตริกสูง ทำให้เกิดแรงดึงดูดเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำต่อน้ำ เส้นใยที่อมน้ำอยู่จะถูกแรงไฟฟ้าสถิตดึงให้เคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้า เมื่อถึงขั้วไฟฟ้าแล้วปลายของเส้นใยจะมีสนามไฟฟ้าสูง ทำให้เส้นใยค่อยๆ ไปถูกดึงดูดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตให้มาจับกับปลายของเส้นใยก่อนหน้านั้น เกิดเป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้แรงดันเบรคความลดลง เรียกว่า เกิดการเบรคความเนื่องจากสะพานเส้นใย (Fiber Bridge)

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เช่น ขั้วไฟฟ้าแท่งกลมปลายแหลมนั้น แรงดันเบรคดาวน์จะต่ำกว่าในกรณีของสนามไฟฟ้าเสมอ นอกจากนี้ที่ขั้วไฟฟ้าแท่งกลมปลายแหลมจะมีฟองก๊าซเกิดขึ้น ทำให้การเกาะของเส้นใยไม่มั่นคง ดังนั้น ผลของสิ่งเจือปนจึงไม่ปรากฏชัดเจนเหมือนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

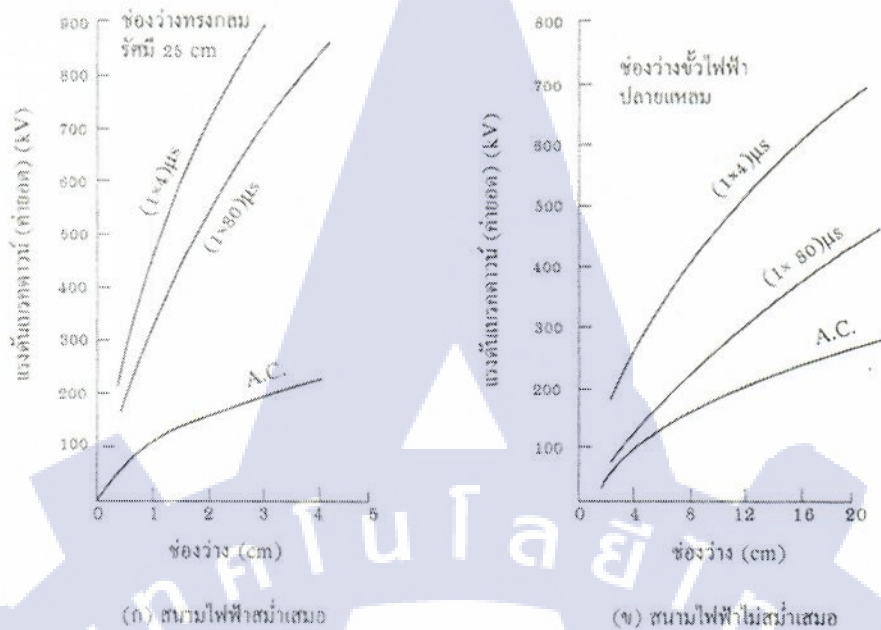
นอกจากนี้ ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์นั้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าดำรงอยู่เพียงชั่วขณะทำให้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้วยเส้นใยจึงมีไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงไม่ปรากฏผลของสิ่งเจือปนในกรณีของแรงดันอิมพัลส์

- **แรงดันอิมพัลส์**

ในรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงแรงดันเบรคดาวน์ 50% เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับแรงดันเบรคดาวน์กระแสสลับ (ถ่ายอด) อัตราส่วนระหว่างแรงดันเบรคดาวน์ 50% ต่อแรงดันเบรคดาวน์กระแสสลับนั้น เราเรียกว่า อัตราส่วนอิมพัลส์ (Impulse Ratio) ในกรณีของก๊าซนั้น อัตราส่วนอิมพัลส์ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกือบเท่ากับ 1 แต่ของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอจะมากกว่า 1 ในกรณีของน้ำมันฉนวนนั้น อัตราส่วนอิมพัลส์ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะมากกว่าของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เหตุผลประการหนึ่งก็คือ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แรงดันเบรคดาวน์กระแสสลับจะได้รับผลกระทบจากสิ่งเจือปนได้ง่ายกว่า

- **ลักษณะของขั้วไฟฟ้า**

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันฉนวนนั้น แม้ว่าจะมีระยะห่างของแท่งเท่ากันแต่ถ้าพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ามีมาก ก็จะทำให้แรงดันเบรคดาวน์ลดลง ซึ่งเราเรียกว่า ผลของพื้นที่ และถ้าเพิ่มระยะห่างของแท่งโดยให้พื้นที่ขั้วไฟฟ้าคงที่ ความเข้มของสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์จะลดลง ซึ่งเรียกว่า ผลของปริมาตร เป็นการยากที่จะแยกแยะโดยการทดลองว่าอะไรเป็นผลงานของพื้นที่ อะไรเป็นผลของปริมาตร แต่อาจกล่าวได้ว่า เมื่อขั้วไฟฟ้ามีพื้นที่มากขึ้นหรือน้ำมันมีปริมาตรมากขึ้น จะทำให้เกิดจุดอ่อนเพิ่มมากขึ้น จุดอ่อนเหล่านี้อาจเป็นปลายแหลมเล็กๆ บนผิวขั้วไฟฟ้า ก๊าซที่ฝังตัวอยู่ในขั้วไฟฟ้าหรือสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำมัน สิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์ขึ้น



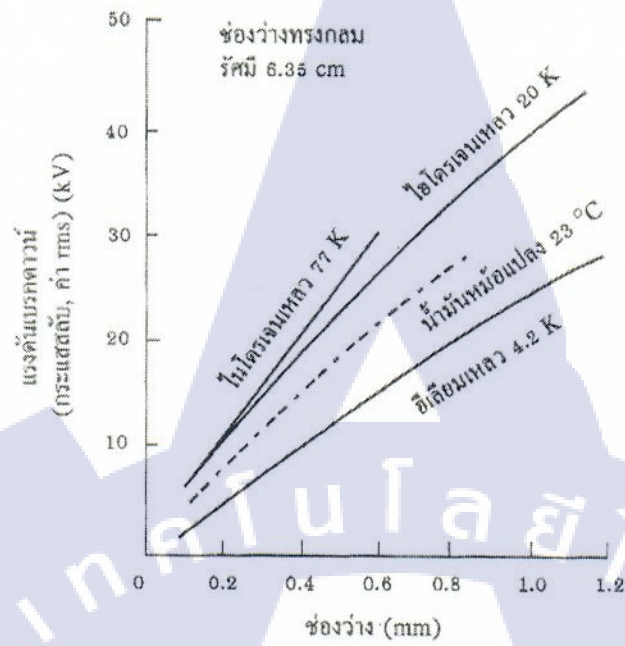
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลง

2.4.5 ก๊าซเหลว [9]

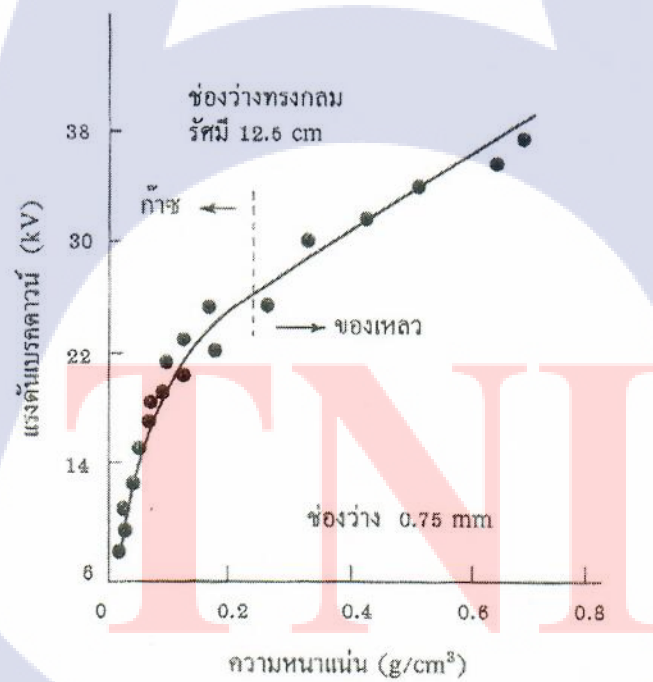
ในการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การนำยิ่งยวด (Superconductivity) นั้น ได้มีการนำเทคโนโลยีของก๊าซเหลวที่อยู่ในสภาพอุณหภูมิต่ำมาก ๆ (Cryogenic) เข้ามาใช้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซเหลวไว้พอสังเขป ดังนี้

รูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของก๊าซเหลวเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงจะแตกต่างกันแล้วแต่ความบริสุทธิ์ ที่แสดงไว้ในรูปเป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งเท่านั้น จะเห็นว่าก๊าซไนโตรเจนเหลวและก๊าซไอโดรเจนเหลวมีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้น สายเคเบิลหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในสภาวะอุณหภูมิต่ำมาก ๆ นั้น เราสามารถนำก๊าซเหลวเหล่านี้มาใช้แทนน้ำมันหม้อแปลงได้

รูปที่ 2.16 นั้น เป็นการหาแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน ทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงจากย่านที่เป็นก๊าซจนกลายเป็นของเหลว เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับแรงดันเบรกดาวน์จะพบว่า แรงดันเบรกดาวน์จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องความหนาแน่นยิ่งมาก แรงดันเบรกดาวน์ยิ่งสูง



รูปที่ 2.15 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซเหลว



รูปที่ 2.16 แรงดันเบรกดาวน์กับความหนาแน่นของ CO_2

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ ต้องการออกแบบให้เป็นเครื่องต้นแบบ ที่สามารถนำไปพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมจริงในเชิงพาณิชย์ได้ ที่ต้องคำนึงถึง ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ ปริมาณการผลิตที่เพียงพอ ความเชื่อถือได้ของเครื่องผลิต วัตถุดิบของเหลวที่ใช้ และการซ่อมบำรุง เป็นต้น โดยกำหนดให้เครื่องผลิตใช้กำลังไฟฟ้า 20 KW แต่สามารถปรับแต่งให้รองรับกำลังไฟฟ้าได้ถึง 150 KW

3.1 การออกแบบตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์ค

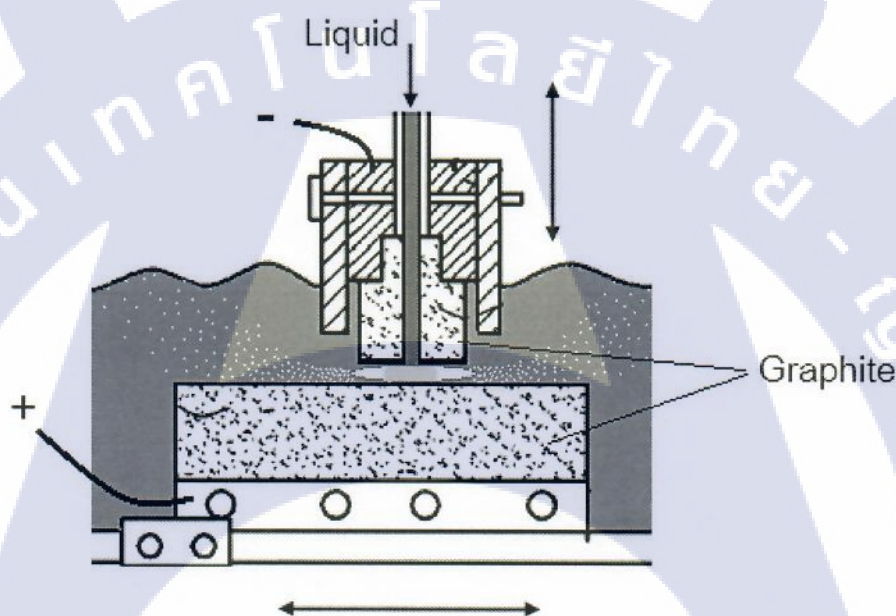
ตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์ค ถือได้ว่าเป็นหัวใจหลักที่สำคัญของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ด้วยวิธีพลาสมาอาร์คได้ของเหลว เนื่องจากจะเป็นตัวบ่งชี้ถึง ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ ความเชื่อถือได้ในการผลิต อัตราการผลิต ระยะเวลาที่ผลิตได้อย่างต่อเนื่อง และการซ่อมบำรุงที่สะดวก ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการผลิตจากทฤษฎีในบทที่ 2 จะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลักดังนี้

- 1) อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่แปรผันต่อ ความดันและอุณหภูมิ ในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ถ้ามีความดันมากก็จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย และ ถ้ามีอุณหภูมิในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ก็ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ อุณหภูมิดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้ในการอาร์ค
- 2) ปริมาตรของขอบเขตที่เกิดปฏิกิริยา จะแปรผันกับขนาดของพลาสมาอาร์ค และบริเวณที่อยู่ในส่วนที่มีความร้อนสูง ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ใช้อาร์คสูงขึ้น ขนาดของพลาสมาอาร์คก็จะมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ ถ้า ความต่างศักย์ ระหว่างแคโทด และแอโนด สูงขึ้น ก็จะทำให้ขนาดของพลาสมาอาร์คเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน
- 3) ชนิดของของเหลว อัตราการลำเลียงของเหลวเข้ามาในบริเวณอาร์ค และอัตราการลำเลียงก๊าซ CO และ H_2 ออกไปจากบริเวณอาร์ค ที่สำคัญกับโครงสร้างทางเรขาคณิตของกราฟต์และรูปแบบการลำเลียงของเหลว

ในทางเทคนิคการอาร์คได้ของเหลวนั้น เกิดจากการเบรกดาวน์ในของเหลวที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4.3 การเบรกดาวน์ในของเหลว สามารถเกิดขึ้นได้โดย การเบรกดาวน์โดยอิเล็กทรอนิกส์

จากการชนของอิเล็กตรอนทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นไอออน และจากการเบรคดาวน์ในฟองก๊าซ เนื่องจากกระแสอิเล็กตรอนทำให้เกิดความร้อนทำให้ของเหลวระเหิดกลายเป็นฟองก๊าซ รวมถึงการชนของอิเล็กตรอนทำให้โมเลกุลของเหลวแตกตัวเป็นฟองก๊าซ ในที่นี้ฟองก๊าซดังกล่าว ก็คือก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

การออกแบบรูปทรงของขั้วไฟฟ้า แอโนด และแคโทด สำหรับพลาสมาอาร์ค จะต้องทำให้มี สนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ MV/cm ให้มีค่าน้อยที่สุด เพื่อทำให้ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้จะปริมาตรของขอบเขตที่เกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย โดยรูปแบบตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คที่ได้ออกแบบอยู่ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คได้ของเหลว

ตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คในรูป 3.1 นั้นประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแผ่นกราฟไฟต์ ด้านบนเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด - และด้านล่างเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด + ที่มีความหนาของแผ่นกราฟไฟต์เท่ากัน โดยขั้วไฟฟ้าในรูปทรงแบบแผ่นและอาร์คไฟฟ้าตรงบริเวณขอบ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ MV/cm ต่ำลง เป็นผลให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองระหว่างการอาร์คมากขึ้น ในที่นี้ปริมาตรขอบเขตที่เกิดปฏิกิริยาก็สูงขึ้นตามไปด้วย

ของเหลวที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซ จะต้องเป็นของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำมันชนิดต่าง ๆ ที่ใช้แล้ว เช่น เอทิลีนไกลคอล เพื่อที่จะทำให้การผลิตก๊าซมีประสิทธิภาพสูง ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.3.2 โดยของเหลวจะถูกป้อนจากแกนของขั้วไฟฟ้ากราฟไฟต์แอโนด และถูกลำเลียงไปยังบริเวณที่เกิดพลาสมาอาร์ค ในรูป 3.1 วิธีการลำเลียงของเหลวแบบนี้จะทำให้ของเหลว

เข้าสู่บริเวณพลาสมาอาร์คทั้งหมด เป็นการใช่วัตถุดิบหรือสารประกอบน้ำมันใช้แล้วอย่างมีประสิทธิภาพ และในอีกแง่หนึ่งของเหลวกี้จะได้ถูกบำบัดไปทั้งหมดเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานในเชิงปฏิบัติ ที่ต้องมีการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้รูปแบบของตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คในรูปที่ 3.1 นั้น สามารถทำให้เครื่องผลิตก๊าซได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องเปลี่ยนแผ่นกราฟไฟต์ เป็นเวลานานได้ถึง 1-2 สัปดาห์สำหรับการใช้งานจริงได้ โดยระยะเวลาจะขึ้นอยู่กับขนาด กว้าง * ยาว ของแผ่นกราฟไฟต์แคโทด และความยาวหรือความสูงของแผ่นแอโนดที่สอดคล้องกัน

อีกทั้งการเคลื่อนที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทดแบบเส้นตรงในแกนนอนนั้น สามารถถูกควบคุมได้โดยง่าย และมีความน่าเชื่อถือที่ดี และยังทำให้สามารถเปลี่ยนแผ่นกราฟไฟต์ขนาดใหญ่ ที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดโดยง่าย เพราะอยู่ในแกนนอน โดยสามารถออกแบบตัวรองรับแผ่นกราฟไฟต์แอโนด ให้สามารถเลื่อนไปด้านข้างนอกถึงความดันและเปลี่ยนและใส่กลับได้โดยง่าย

ทั้งนี้เราสามารถปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตก๊าซได้โดย เพิ่มพื้นที่ขั้วไฟฟ้าส่วนที่ใช้ในการอาร์คให้สูงขึ้น ก็คือปรับเปลี่ยนความหนาของแผ่นกราฟไฟต์ทั้งสองให้มากขึ้น หรือจะเพิ่มความกว้างของแผ่นกราฟไฟต์แอโนดให้มากขึ้น เพียงอย่างเดียวก็ได้ อย่างไรก็ตามเครื่องจ่ายไฟฟ้าดีซีให้กับการอาร์คไฟฟ้าได้ของเหลวกี้ ก็ต้องปรับกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น สอดคล้องกับพื้นที่ตรงบริเวณอาร์คที่เพิ่มขึ้นด้วย

งานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์ค 20 KW สอดคล้องกับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ากราฟไฟต์ประมาณ 400 ตารางมิลลิเมตร ที่ได้จากการทดสอบในเบื้องต้น โดยกำหนดให้

- แผ่นกราฟไฟต์ ขั้วไฟฟ้าแอโนดมีขนาด (กว้าง × ยาว × หนา)

18 × 95 × 24 มิลลิเมตร

- แผ่นกราฟไฟต์ ขั้วไฟฟ้าแคโทดมีขนาด

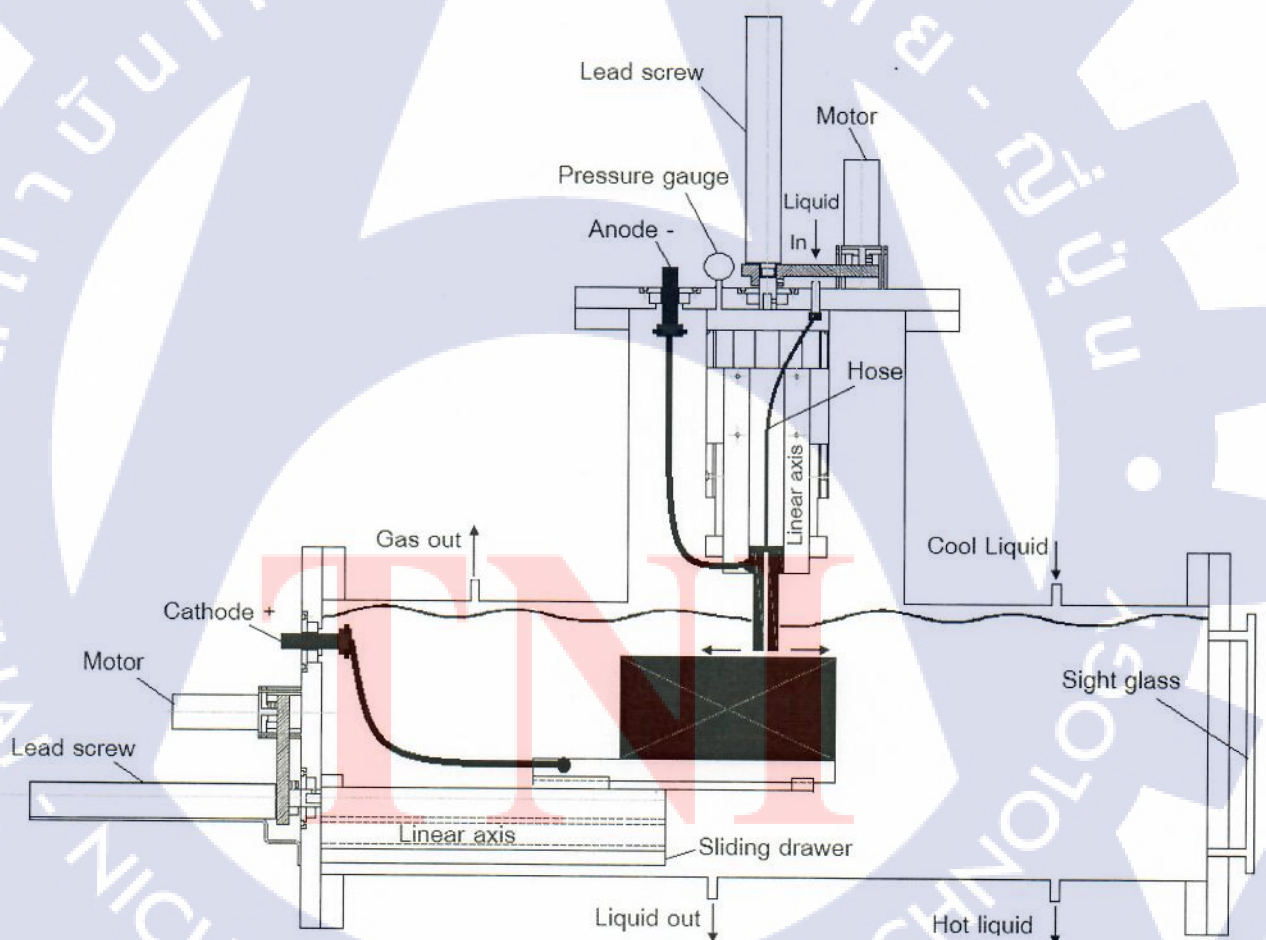
125 × 250 × 24 มิลลิเมตร

3.2 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์ค

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีอาร์คไฟฟ้าได้ของเหลวในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนตัวถังปฏิกรณ์เครื่องผลิตก๊าซ และส่วนการออกแบบกระบวนการทำงานเครื่องผลิตก๊าซ

3.2.1 การออกแบบส่วนถังปฏิกรณ์เครื่องผลิตก๊าซ

การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงนี้ จะออกแบบเพื่อให้รองรับกับการนำไปใช้งานจริง ในอุตสาหกรรมขนาดกลาง ถึงขนาดใหญ่ ที่ต้องคำนึง ประสิทธิภาพที่สูงเพียงพอ การรองรับการผลิตโดยใช้กำลังไฟฟ้าได้ 10 KW ถึง 150 KW และเครื่องผลิตก๊าซสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ถึง 1 สัปดาห์ โดยไม่ต้องซ่อมบำรุง เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในส่วนที่ติดตั้งไว้กับถังแรงดันนั้น ที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 3.2

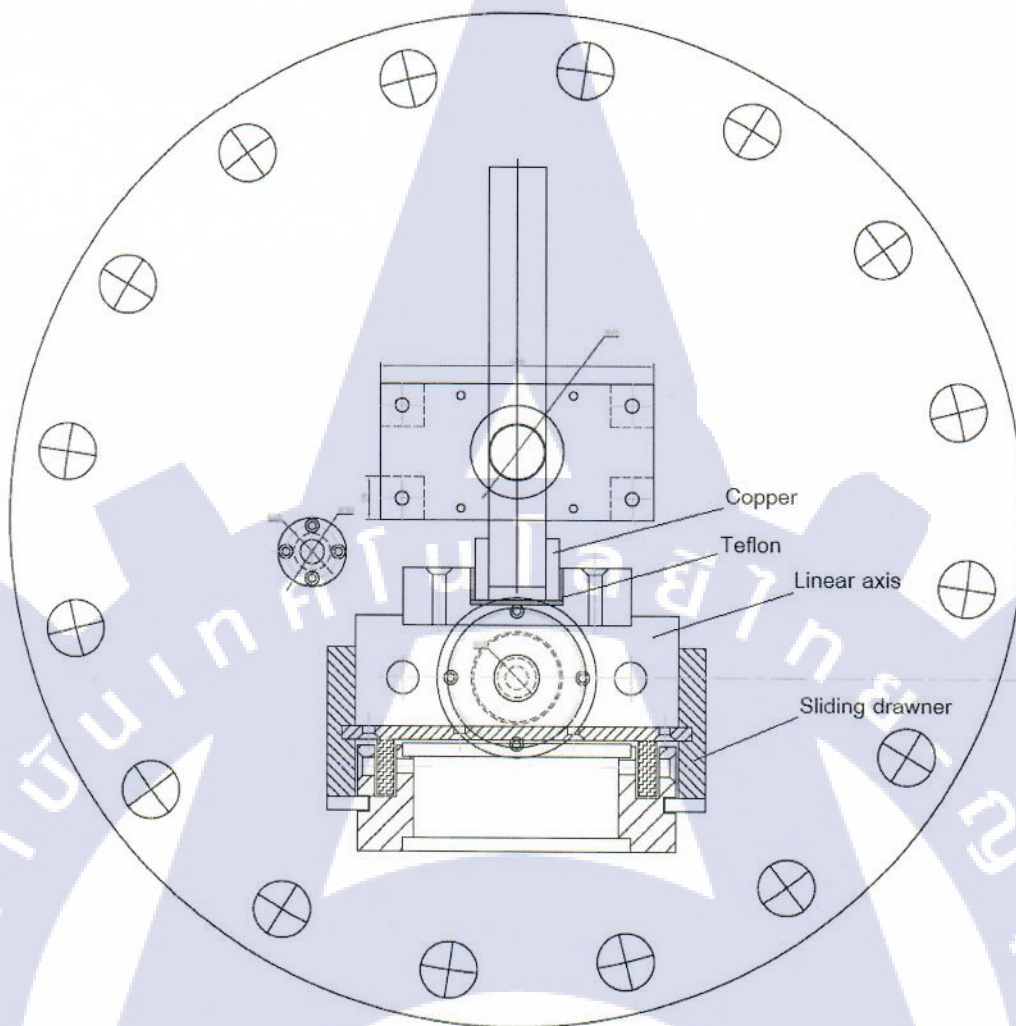


รูปที่ 3.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสมาอาร์คได้ของเหลว

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 3.2 นั้น ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ ในลักษณะทอรูปตัว T กลับหัว ท่อแกนนอนยาว 1000 mm ท่อแกนตั้งสูง 450 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านใน 300 mm โดยมีฝาปิดที่สามารถ ถอดเข้าออก ได้ 3 ด้าน ฝาด้านในและด้านนอก จะถูกคั่นด้วยประเก็น และมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณฝาดังทั้ง 3 ด้าน ทั้งนี้การออกแบบ ชิ้นส่วนต่าง ๆ รวมถึงอุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งนั้น จะต้องสามารถทนต่อแรงดันภายในได้ถึง สูงสุด 20 bar การอาร์คใต้ของเหลวภายในถังปฏิกรณ์นี้ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาพลาสมาอาร์ค สูงกว่า การอาร์คภายใต้ความดันบรรยากาศปรกติ เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสูงขึ้นด้วย

กลไกภายในถังปฏิกริยาในรูป 3.2 ประกอบด้วย Linear axis แกนนอน และแกนตั้ง ที่ถูก เชื่อมติดไว้กับฝาดังด้านในและเชื่อมต่อคัปปลิงแกนไปยังฝาด้านนอก โดย Linear axis แกนนอนจะ วางไว้บนรางที่ติดตั้งไว้ภายในถังทำให้สามารถเลื่อนฝาปิดออกไปด้านข้างได้ได้ง่าย โดยไม่ต้องยก ออก เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแผ่นกราไฟต์และซ่อมบำรุง ส่วน Linear axis แกนตั้งก็สามารถถูกถึง ออกได้เช่นเดียวกันเพื่อเปลี่ยนแผ่นกราไฟต์แอโนด และซ่อมบำรุง และ จะมีมอเตอร์ที่ติดตั้งไว้ที่ฝาดังปฏิกรณ์ด้านนอกและส่งกำลังมายังสายพานเชื่อมต่อกับแกนของ Linear axis ภายในถัง ในส่วน ของ Linear axis แกนนอน เมื่อมอเตอร์หมุนจะทำให้ส่วนของ แผ่นกราไฟต์ขับเคลื่อนไป ซ้ายหรือขวา โดยอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ภายนอกจะควบคุมให้ แผ่นกราไฟต์แกนนอนเคลื่อนที่ ไป 250 mm กลับ 250 mm เป็นรายคาบเวลา สอดคล้องกับขนาดของแผ่นกราไฟต์ อย่างต่อเนื่อง ส่วน Linear axis แกนตั้งเมื่อมอเตอร์หมุนจะทำให้แผ่นกราไฟต์แอโนดเคลื่อนขึ้นลงได้ เพื่อใช้ในการ ควบคุมการอาร์คไฟฟ้าใต้ของเหลว ทั้งนี้แผ่นกราไฟต์ทั้งแคโทดและแอโนด จะถูกติดตั้งไว้ กับแกนของ Linear axis ที่มีแผ่นทองแดงยึดกับแผ่นกราไฟต์ไว้ และถูกคั่นไว้ด้วยฉนวนทนเพลตอน ดังรูป 3.3 โดยมีสายไฟฟ้าเชื่อมต่อจากแผ่นทองแดงไปยังแท่งทองแดงแคโทดภายนอก

ในส่วนของฝาดังด้านบน จะมีท่อลำเลียงของเหลวจากภายนอกเข้ามาภายในถังแรงดันโดย ฝาดังด้านในจะมีท่ออ่อนแรงดันเชื่อมต่อออกไปยังแกนของแผ่นกราไฟต์แอโนด ที่มีถูกเจาะไว้เป็น ช่องให้น้ำลำเลียงผ่านไปยังบริเวณอาร์คได้ เมื่อมีของเหลวเข้ามาในถัง ก็จะต้องมีการดึงของเหลว ออกไปนอกถังบริเวณด้านล่างถึง ทั้งนี้เราสามารถควบคุมระดับน้ำได้โดยดูจากท่อแก้ววัดระดับ (sight glass) ที่ถูกติดตั้งบนฝาดังด้านนอก ที่สามารถติดตั้งแถบเซนเซอร์วัดระดับน้ำเพื่อใช้ในระบบ ควบคุมอัตโนมัติต่อไป และส่วนฝาดังด้านบนจะมีเกวียดความดันติดตั้งไว้ ส่วนเกวียดอุณหภูมิ สามารถติดตั้งไว้กับตัวถังแรงดันได้ต่อไป



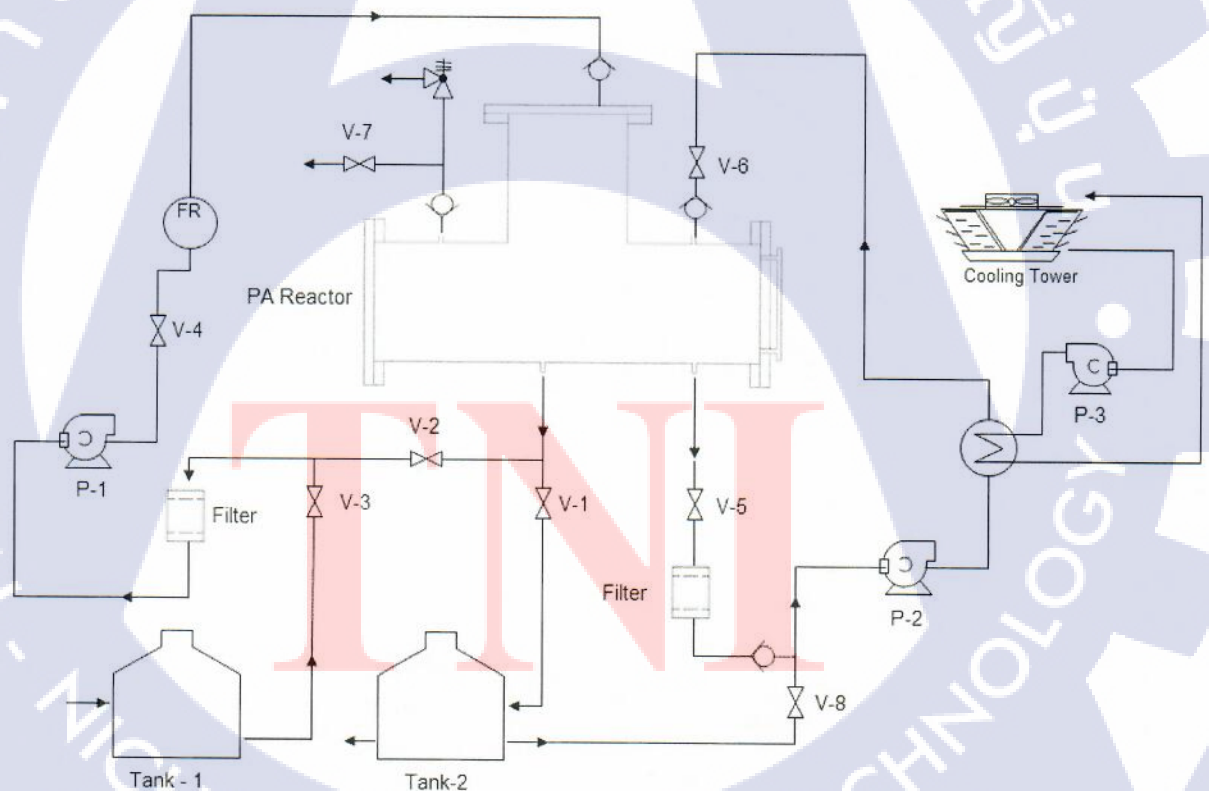
รูปที่ 3.3 แบบแปลนด้านข้างฝาดึงปฏิกิริยา

สำหรับวิธีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากรูป 3.2 เริ่มจากเติมของเหลวที่เป็นวัตถุดิบเข้าไปในถังปฏิกิริยาก่อน จากนั้นเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า DC ภายนอก ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าเข้ามายังขั้วไฟฟ้าแผ่นกราฟไฟต์ทั้งสอง จากนั้นมอเตอร์ที่ฝาดึงด้านข้างจะควบคุมให้ แกนแผ่นกราฟไฟต์แคโทด ในรูป 3.3 เคลื่อนที่ ไป - กลับ ในแนวนอน ด้วยความเร็วคงที่ที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ต่อมาของเหลวที่เป็นวัตถุดิบภายนอกจะถูกปล่อยจากท่อได้ดังปฏิกิริยา ส่งกลับมายังท่อที่ฝาดึงด้านบน และถูกปล่อยลงเข้าไปยังแกนกลางของแผ่นกราฟไฟต์แอโนดแกนตั้งฉีดออกไปที่ปลายของแผ่นกราฟไฟต์แอโนด และมอเตอร์ที่ฝาดึงด้านบนจะควบคุมให้แผ่นกราฟไฟต์แอโนดเคลื่อนที่ลงมาอย่างช้า ๆ มาใกล้ ๆ กับแผ่นกราฟไฟต์แคโทด จนทำให้เกิดการอาร์คไฟฟ้าได้ของเหลว แผ่นกราฟไฟต์แอโนดจะถูกควบคุมขึ้นลงอย่างละเอียดในระดับ μm เพื่อควบคุมให้การอาร์คเป็นไปอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้การอาร์คไฟฟ้าได้ของเหลวจะมีความร้อนเกิดขึ้นและนำความร้อนไปยังตัวถังปฏิกรณ์รวมไปถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต่ออยู่กับถังปฏิกรณ์มีความร้อนสูงขึ้นด้วย ดังนั้นเราจำเป็นต้องระบายความร้อนให้กับของเหลวอยู่ในอุณหภูมิที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต่ออยู่กับถังปฏิกรณ์ให้สามารถทำงานได้ ในงานวิจัยนี้จะควบคุมไม่ให้อุณหภูมิเกินกว่า 50 องศาเซลเซียส โดยลำเลียงของเหลวออกจากท่อแรงดันด้านล่าง ออกไปยังระบบระบายความร้อน และส่งกลับมายังถังแรงดัน

3.2.2 การออกแบบกระบวนการทำงานเครื่องผลิตก๊าซ

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คได้ของเหลวในงานวิจัยนี้ จะถูกออกแบบให้มี 2 รูปแบบการทำงานคือแบบ Total Refineries และแบบ Linear Refineries โดยวิธีของ Total Refineries นั้นของเหลวที่เป็นวัตถุดิบจะถูกเก็บไว้ในถังปฏิกรณ์ จะถูกลำเลียงผ่านการอาร์คไฟฟ้าได้น้ำกลับเข้าไปในถังปฏิกรณ์อีกครั้งและจะทำซ้ำ ๆ ในระยะเวลาหนึ่ง ส่วนวิธี Linear Refineries ของเหลวที่เป็นวัตถุดิบจะผ่านการอาร์คไฟฟ้าได้ของเหลวเพียงครั้งเดียว และจะถูกลำเลียงออกไปนอกถังปฏิกรณ์ โดยกระบวนการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซที่ได้ออกแบบอยู่ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังกระบวนการทำงานเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

กระบวนการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในรูปที่ 3.4 นั้น Tank-1 ใช้เก็บของเหลวที่เป็นวัตถุดิบ Tank -2 เป็นถังเก็บน้ำหรือของเหลวที่ผ่านกระบวนการพลาสมาอาร์คแล้ว ส่วน ปัม P-1 ใช้สำหรับลำเลียงของเหลววัตถุดิบเข้าไปกักเก็บในถังหรือเข้าไปผ่านกระบวนการพลาสมาอาร์ค ส่วนปัม P-2 ใช้ลำเลียงของเหลวออกจากถังปฏิกรณ์ไประบายความร้อนที่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและลำเลียงของเหลวที่มีอุณหภูมิลดลงกลับเข้ามาในถังปฏิกรณ์อีกครั้ง ส่วนปัม P -3 ใช้ในการลำเลียงน้ำเพื่อระบายความร้อนระหว่าง ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนกับ Cooling Tower และวาล์ว V-4 จะใช้ควบคุมอัตราการไหลวัตถุดิบของเหลวที่เข้าสู่กระบวนการพลาสมาอาร์ค วาล์ว V-7 ใช้เปิดหรือปิดให้ก๊าซหรืออากาศภายในถังไหลออกได้ ขณะนำของเหลวเข้าถังหรือซ่อมบำรุง

กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเริ่มต้นจาก ปัม P-1 P2 และ P-3 ปิดการทำงาน จากนั้นลำเลียงของเหลวที่ใช้เป็นวัตถุดิบใส่ไว้ใน Tank-1 ส่วน และลำเลียงน้ำสะอาดใส่ไว้ใน Tank-2 การทำงานขั้นต่อไปจะขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตสองแบบดังนี้

- 1) วิธี Total Refineries นั้นเริ่มต้นจาก เปิดวาล์ว V-3 และ V-4 และปิด วาล์วที่เหลือทั้งหมด จากนั้นเปิดปัม P-1 ลำเลียงของเหลวเข้าไปในถังปฏิกรณ์ จนกระทั่งระดับของเหลวของเหลวในถังปฏิกรณ์อยู่ที่ขีดจำกัดบน จึงปิดการทำงาน ปัม P-1 และเปิดวาล์ว V-2 V-2 V-4 V-5 และ V-6 ส่วนวาล์ว V-1 V3 V-7 และ V-8 จะปิด จากนั้นเปิดการทำงาน ปัม P-1 อีกครั้งเพื่อลำเลียงของเหลวที่กักเก็บไว้ภายในถังปฏิกรณ์ เข้าไปยังแกนกลางของแผ่นการไฟต์แอโนด โดยปรับตำแหน่งวาล์ว V-4 ให้อัตราการไหลของเหลวให้อยู่ในระดับที่ต้องการ จากนั้นเปิดสวิตช์เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ ขั้วแอโนดและแคโทด และเปิดการทำงานส่วนของการควบคุมมอเตอร์ Linear axis ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.1 ที่มอเตอร์จะควบคุมให้แผ่นกราฟไฟต์แคโทด เคลื่อนที่ไปซ้าย-ขวาในแนวนอน และมอเตอร์ที่ควบคุม Linear axis แกนตั้งจะควบคุมให้แผ่นกราฟไฟต์แอโนดแกนตั้งเคลื่อนลงมา จนกระทั่งเกิดการอาร์คได้ของเหลว ทำให้เกิดฟองก๊าซเชื้อเพลิง และก๊าซเชื้อเพลิงก็จะลอยขึ้นไปเหนือของเหลวด้านบนในถังปฏิกรณ์ ความดันภายในถังปฏิกรณ์ก็จะสูงขึ้น จนกระทั่งถึงความดันที่ Pressure Relief Valve ดังค่าไว้ ก๊าซเชื้อเพลิงก็จะถูกปล่อยออกไปกักเก็บในถังก๊าซภายนอก เมื่อเกิดการอาร์คได้น้ำอุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับขีดจำกัดบน ปัม P-2 และ P-3 จะเปิดการทำงานทำให้อุณหภูมิของเหลวภายในถังปฏิกรณ์ลดลงต่ำกว่าระดับขีดจำกัดล่าง ปัม P-2 และ P-3 จะปิดการทำงาน โดยการเปิด-ปิดปัม P-2 และ P-3 เพื่อระบายความร้อนจะดำเนินต่อไปในช่วงการผลิตก๊าซ

- 2) วิธี Linear Refineries นั้นเริ่มต้นจากเปิดวาล์ว V-6 V-7 และ V-8 ส่วนวาล์วที่เหลือปิดทั้งหมด จากนั้น เปิดการทำงานของปั๊ม P-2 ลำเลียงน้ำจาก Tank-2 ให้เข้ามาพักเก็บไว้ในถังปฏิกรณ์จนถึงระดับขีดจำกัดล่าง ปั๊ม P-2 จะหยุดการทำงาน หลังจากนั้นระบบวาล์ว V-2 V-7 และ V-8 จะต้องปิดไว้ ส่วนวาล์ว V-1 V-3 V-4 V-5 และ V-6 จะเปิด จากนั้นปั๊ม P-1 จะเปิดการทำงานลำเลียงของเหลวจาก Tank-1 ส่งเข้าไปยังแกนกลางของแผ่นกราฟไฟต์ แอนโอดภายในถังปฏิกรณ์ โดยปรับตำแหน่งวาล์ว V-4 ให้อัตราการไหลของเหลวอยู่ในอัตราที่ต้องการ จากนั้นเปิดสวิตช์เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ ขั้ว แอนโอดและแคโทด และขั้นตอนการควบคุมพลาสมาอาร์ค และระบายความร้อนก็จะเริ่มต้นขึ้นเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.2.2 - 1) อย่างไรก็ตามเมื่อของเหลวเข้าไปทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คในถังปิด ระดับของเหลวในถังปฏิกรณ์จะสูงขึ้น เมื่อสูงขึ้นถึงระดับขีดจำกัดบน วาล์ว V-1 จะถูกเปิด เพื่อให้ของเหลวที่ผ่านการอาร์คไฟฟ้าได้น้ำ แล้วลำเลียงออกมาจากถังปฏิกรณ์เข้าสู่ Tank-2 จนกระทั่ง ระดับของเหลวในถังปฏิกรณ์อยู่ในระดับขีดจำกัดล่าง วาล์ว V-1 จะถูกปิด และการเปิด-ปิด วาล์ว V-1 เพื่อควบคุมระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ตลอดช่วงผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ทั้งนี้วิธี Total Refineries เหมาะสมกับการที่ใช้วัตถุดิบ เป็นน้ำมันใช้แล้วชนิดต่าง ๆ เนื่องจากมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูง สามารถนำมาผ่านกระบวนการพลาสมาอาร์ค ซ้ำ ๆ เป็นเวลานานเพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพได้ ในอีกแง่หนึ่งจะเป็นการประหยัดวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตก๊าซได้ ส่วนวิธี Linear Refineries นั้นเหมาะกับของเหลวที่เป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือแหล่งชุมชน เพราะในแง่หนึ่ง ในขณะที่ผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ก็จะเป็นการบำบัดน้ำเสียไปในตัวด้วย ดังนั้นวิธีนี้จะสามารถทำให้น้ำบำบัดน้ำเสียได้ในปริมาณมาก

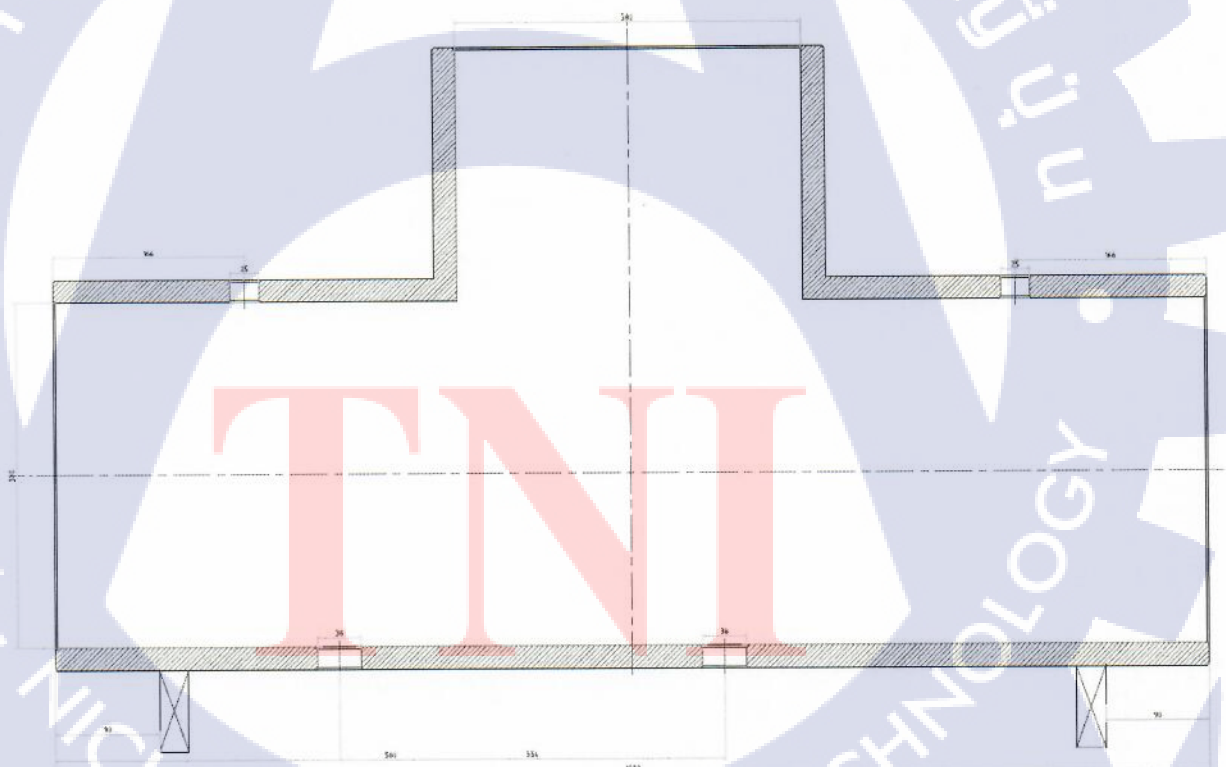
บทที่ 4

การสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสติกสภาวะที่ 1

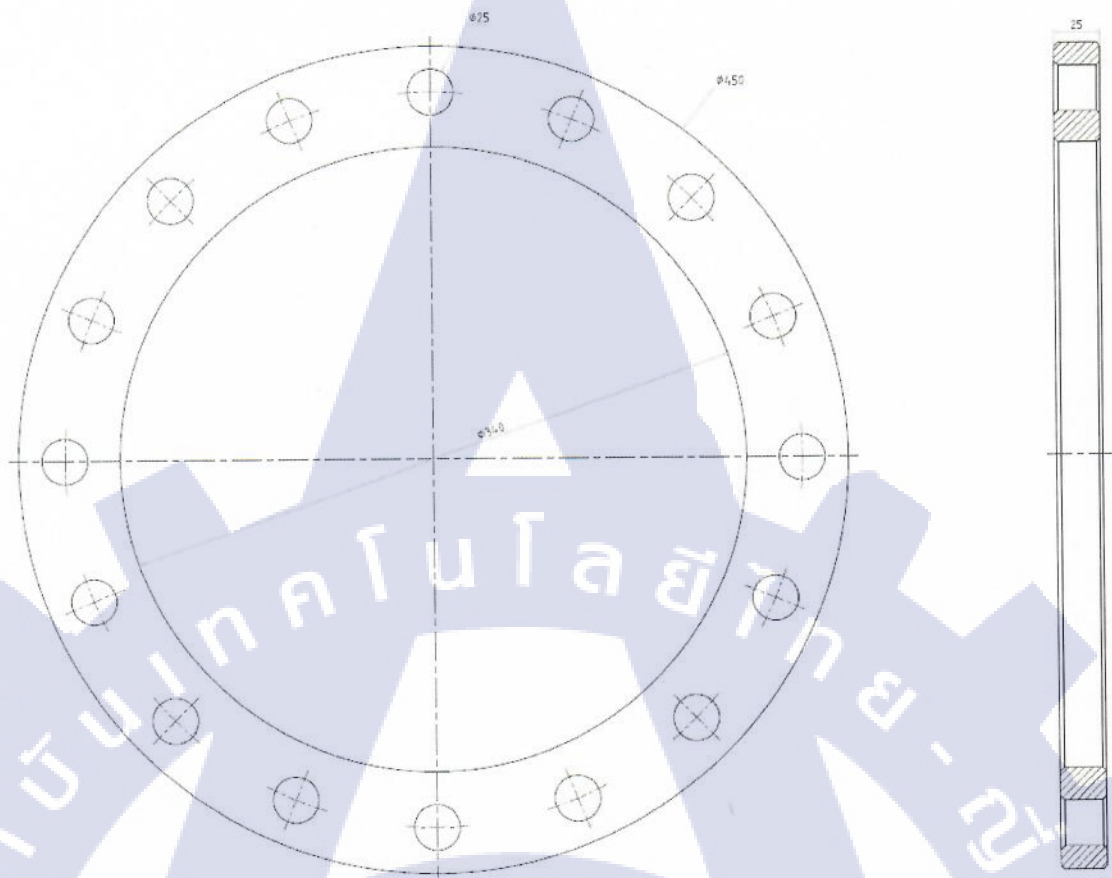
การสร้างเครื่องผลิตก๊าซพลาสติกสภาวะที่ 1 ได้ของเหลว ระยะที่ 1 เป็นการสร้างส่วนประกอบสำคัญที่ติดตั้งกับถังปฏิกรณ์ และอุปกรณ์สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซบางส่วนอีกด้วย รวมถึงจัดเตรียมเครื่องมือวัดต่าง ๆ สำหรับการทดลอง

4.1 การสร้างตัวถังปฏิกรณ์

การสร้างตัวถังปฏิกรณ์จริงนั้น ถูกสร้างขึ้นตามสัดส่วนตามแบบถังปฏิกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2.1 ดังรูป 4.1 และ 4.5 โดยถังปฏิกรณ์ถูกสร้างขึ้นมาจากท่อเคมีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อลดต้นทุนในการจัดจ้างทำและง่ายต่อการซ่อมบำรุง

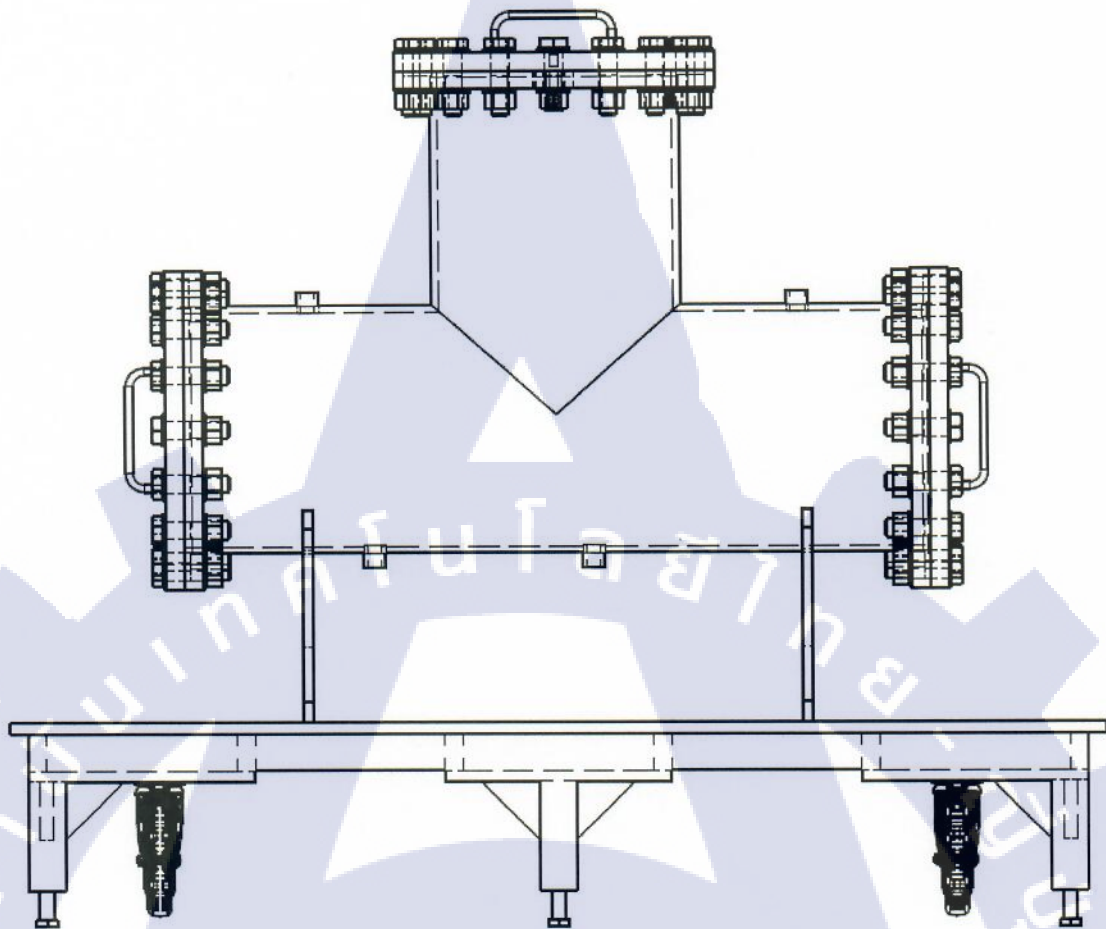


รูปที่ 4.1 แบบแปลนถังปฏิกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้น



รูปที่ 4.2 แบบแปลนฝาถังปฏิกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้น

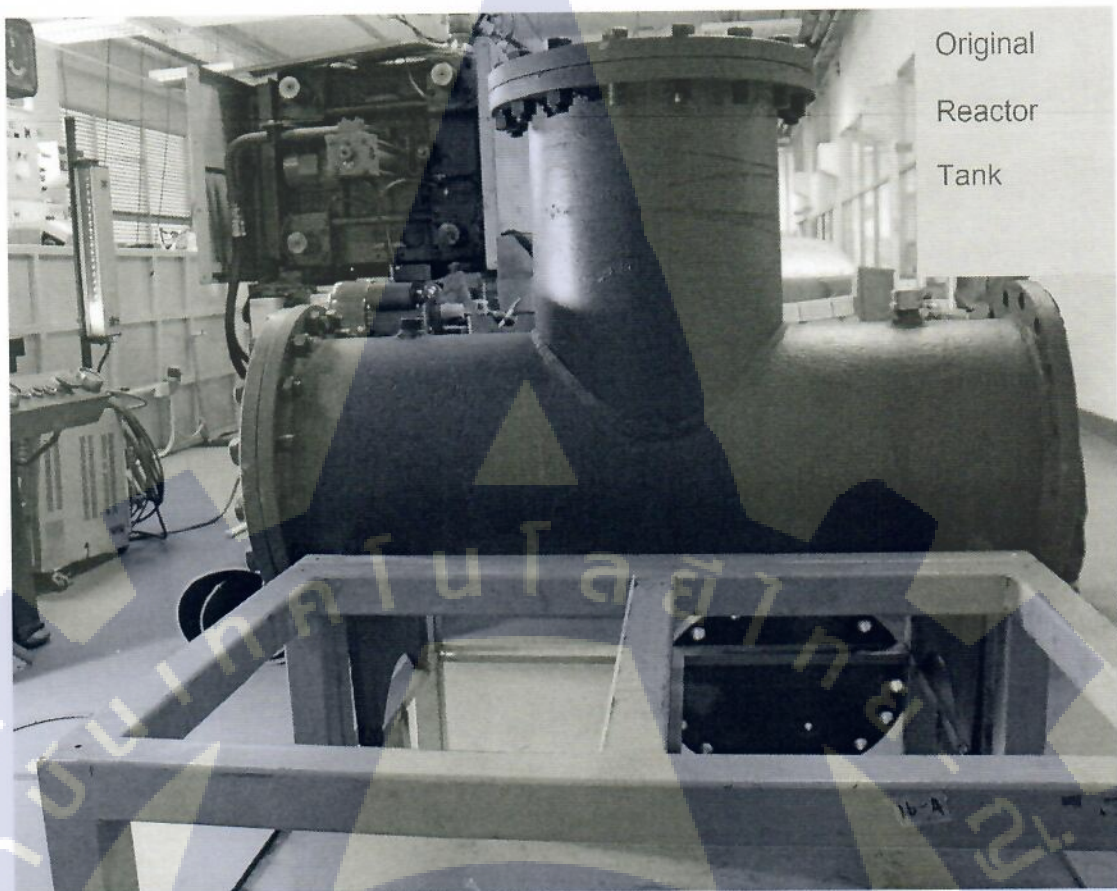
จากแบบถังปฏิกรณ์ในรูปที่ 4.2 นั้น ประกอบมาจากท่อ 2 ท่อ เชื่อมต่อกันเป็นรูปตัว T กลับ หัวที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านในมีขนาด 300 mm เท่ากันทั้ง 2 ท่อ โดยมีความยาวท่อแกนนอนไม่รวมความหนาฝาท่อ 1000 mm ท่อแกนตั้งไม่รวมความหนาฝาท่อ ยาว 230 mm และความหนาท่อ 25 mm ในขณะที่ขนาดฝาท่อในรูป 4.2 นั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 450 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 340 mm และหนา 25 mm โดยถังปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ถูกกำหนดให้สามารถใช้งานในขณะที่มีความดันภายในได้ถึง สูงสุด 20 bar และการเชื่อมท่อ 2 ท่อเข้าด้วยกันนั้น จะต้องเชื่อมโดยช่างที่มีประกาศนียบัตรงานเชื่อม และมีประสบการณ์ในการเชื่อมถึงแรงดัน เมื่อจัดสร้างขึ้นจะต้องทดสอบการทนต่อความดันของถัง โดยอัดน้ำหรือของเหลวเข้าไปอีก แล้ววัดความดันที่เกิดขึ้นในถัง ที่ความดัน ไม่น้อยกว่า 1.3 เท่าของความดันออกแบบ ตาม ASME Section VIII Div.1 2006



รูปที่ 4.3 ตัวถังอุปกรณ์ที่จัดทำขึ้นจากท่อเหล็กแรงดัน 2 ท่อเชื่อมต่อกัน

โดยแบบตัวถังอุปกรณ์ได้จัดสร้างขึ้น ในรูปที่ 4.3 ที่มีขนาดเมื่อเทียบกับของจริง ในอัตราส่วน 1:12 สร้างขึ้นจากการเชื่อมต่อเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี สองท่อและเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ที่ตรงรอยต่อเป็นรูปตัว V ท่อในแนวแกนนอนจะถูกเจาะด้านบนและด้านล่างจำนวน 4 ช่อง และเชื่อมน็อตตัวเมียไว้ เพื่อสามารถให้ท่อของเหลวและก๊าซเชื่อมต่อได้ง่าย โดยถังอุปกรณ์จะมีฝาท่อปิด 3 ด้านในรูปแบบหน้าแปลน ที่ฝาถังแต่ละด้านจะใช้น็อตจำนวน 16 ตัวยึดหน้าแปลนเข้าด้วยกัน ในรูปที่ 4.3 ตัวถังอุปกรณ์จะถูกเชื่อมต่อกับฐานรองรับ ที่ออกแบบให้สามารถปรับระดับ และมีล้อด้านใต้เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยถังอุปกรณ์ปลาวที่จัดสร้างขึ้นและยังไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ใดๆ เข้าไป อยู่ในรูปที่ 4.4

ตัวถังอุปกรณ์ปลาวนั้นสร้างขึ้นจากท่อเคมีที่มีวัสดุเป็น เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เนื่องจากสามารถลดต้นทุนได้มากกว่าการใช้สแตนเลส ประมาณ 4 เท่า

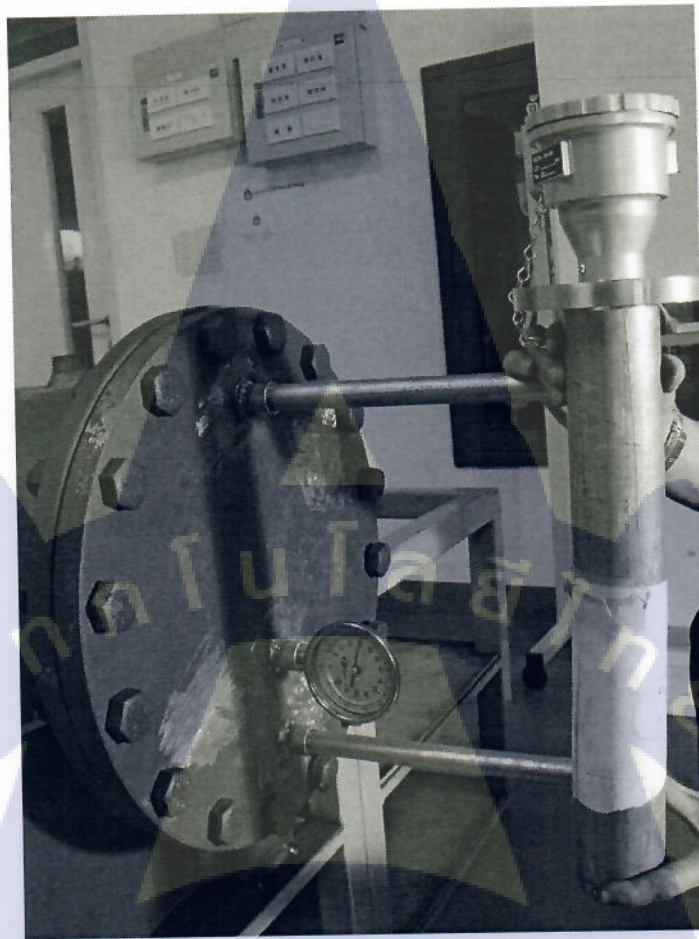


รูปที่ 4.4 ถังปฏิกรณ์เปล่าที่ได้จัดทำขึ้น ติดตั้งไว้กับฐานรองรับ

อย่างไรก็ตามถังปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นทำด้วยเหล็กจึงสามารถเป็นสนิมได้ ดังนั้นจะต้องทาสีป้องกันสนิมไว้ที่ภายนอกของตัวถังด้วย ส่วนด้านในถังไม่ได้มีการทาสีกันสนิมไว้เนื่องจากการใช้งานจริงจะบรรจุของไหลผสม คือน้ำมันใช้แล้วและก๊าซเชื้อเพลิง ที่สัมผัสกับออกซิเจนปริมาณน้อย จึงสึกกร่อนและเป็นสนิมช้ากว่าผิวด้านนอกมาก

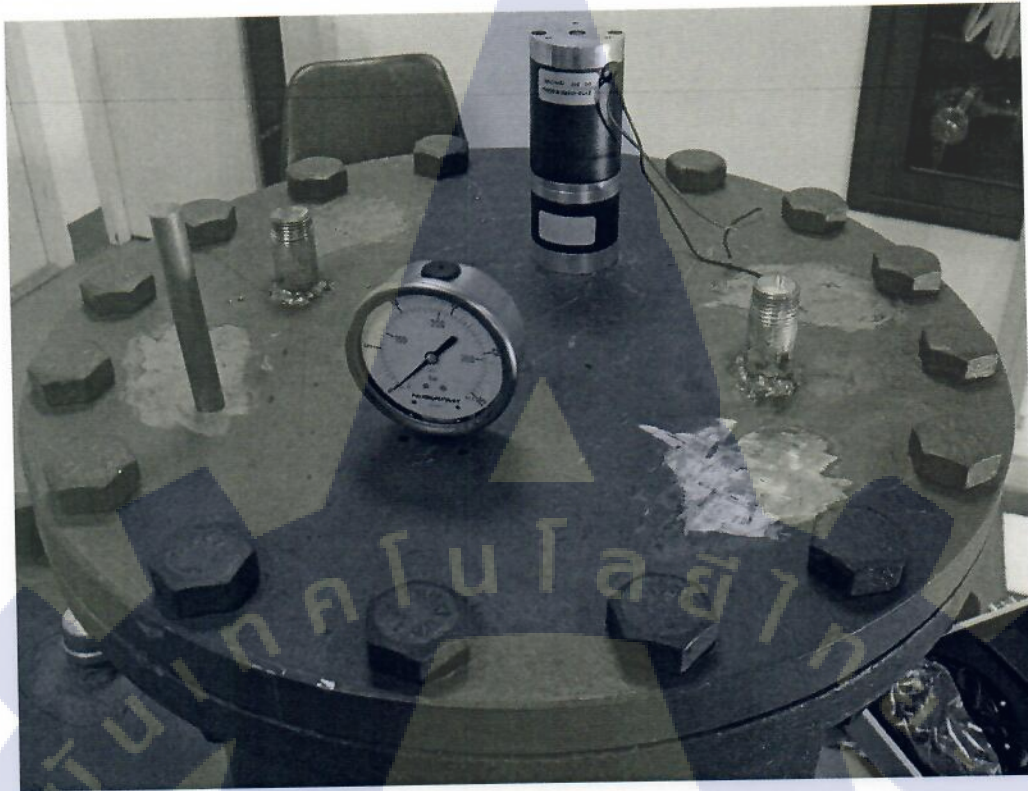
4.2 การจัดสร้างอุปกรณ์และชิ้นส่วนที่ติดตั้งกับถังปฏิกรณ์ ระยะที่ 1

การจัดสร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับถังปฏิกรณ์ ตามรูปที่ 3.1 นั้น ในระยะที่ 1 จะจัดเตรียมเฉพาะส่วนประกอบที่สำคัญก่อนที่จะติดตั้งกับตัวถังก่อน เพื่อทดสอบการทำงานในเบื้องต้น คือ อุปกรณ์วัดระดับของเหลวภายในถัง เกจวัดความดัน เกจวัดอุณหภูมิ แท่งทองแดง ดีซี เซอร์โวมอเตอร์ และจัดสร้าง Linear axis ทั้งแกนตั้งและแกนนอน พร้อมทั้งชุดอุปกรณ์สำหรับติดตั้งแผ่น กราไฟต์ แคโทด และแอโนด เข้ากับ Linear axis



รูปที่ 4.5 สวิทช์ลูกลอยวัดระดับของเหลว 3 ระดับ และเกจวัดอุณหภูมิ ที่เตรียมติดตั้งไว้กับฝาถัง

สำหรับอุปกรณ์วัดระดับของเหลวภายในถังปฏิกรณ์นั้นจะใช้สวิทช์ลูกลอย 3 ระดับติดตั้งกับท่อโลหะสองท่อ ไว้กับฝาถังปฏิกรณ์ด้านข้าง ดังรูป 4.5 ทั้งนี้สวิทช์ลูกลอยที่ได้จัดเตรียมมานั้นสามารถบ่งบอกระดับของเหลวในถังได้ ระดับโดยเราสามารถเชื่อมต่อ LED ออกมาเพื่อบอกถึงระดับของเหลวดังกล่าว ตำแหน่งของสวิทช์ลูกลอยทั้ง 3 ระดับนั้น จะหมายถึงระดับของเหลวเต็มท่อแกนนอนของถังปฏิกรณ์ ถัดไปจะเป็นขีดจำกัดบนของระดับของเหลว และสุดท้ายจะเป็นขีดจำกัดล่าง ในช่วงขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของเหลวนั้นหมายถึงระดับของเหลวที่สามารถทำให้แผ่นกราฟต์บริเวณที่เกิดการอาร์คไฟฟ้ายังคงจมอยู่ในของเหลว การใช้สวิทช์ลูกลอยยังทำให้มีการควบคุมระดับของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอัตโนมัติได้ โดยต่อวงจรควบคุม เข้ากับสวิทช์ลูกลอย และปั๊ม P-1 หรือ วาล์ว V-1 สำหรับวิธี Total Refineries หรือแบบ Linear Refineries จะสามารถควบคุมให้ระดับของเหลวในถังปฏิกรณ์อยู่ในระดับที่ ไม่เกินขีดจำกัดบน และไม่ต่ำกว่าขีดจำกัดล่างได้



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ที่เตรียมไว้ติดตั้งกับฟาลัง ประกอบด้วยเกจวัดความดัน ดิซีเซอร์ โวมอเตอร์ และแท่งทองแดงส่งผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในถังปฏิกรณ์

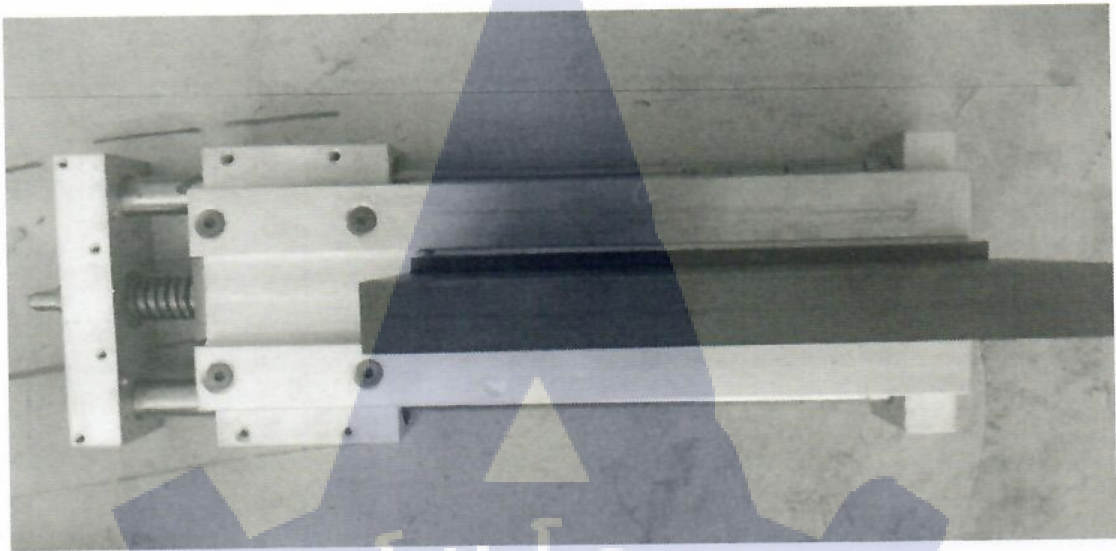
จากรูปที่ 4.6 เป็นการจัดเตรียมเกจวัดความดันที่มีสเกลวัดสูงสุด 25 Bar เพื่อใช้วัดความดันภายในถังปฏิกรณ์ โดยติดตั้งไว้ฟาลังด้านบน และมีแท่งทองแดงบริสุทธิ์ 98% ใช้เป็นตัวส่งผ่านกระแสไฟฟ้า จากภายนอกถังปฏิกรณ์เข้าไปยังภายในถัง ทั้งนี้ค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้ ที่ใช้สำหรับการอาร์คไฟฟ้าได้น้ำ มีค่าเท่ากับ 20 KW เมื่อเกิดการอาร์คไฟฟ้าได้ของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำมัน ค่าโวลเตจตกคล่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะมีค่าประมาณ 43 Volt จากการทดสอบเบื้องต้น ดังนั้นเราจะหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดระหว่างการอาร์คได้เท่ากับ $20\text{KW} / 46\text{ Volt} = 434.78\text{ Amp}$. ดังนั้นตามมาตรฐานเอดับบีวีจี (American Wire Gauge : AWG) ที่ใช้วัดลวดตัวนำไฟฟ้าเป็นสายทองแดง ที่ใช้สำหรับงานเชื่อมไฟฟ้านั้น AWG 4/0 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทองแดงตัวนำ 18.288 mm สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 440 Amp อย่างไรก็ตามเคเบิ้ล ตัวนำในมาตรฐาน AWG นั้นประกอบด้วยสายทองแดงขนาดเล็ก ๆ มัดรวมกัน ดังนั้นเมื่อเทียบกับแท่งทองแดงตันที่นำมาใช้จะมีพื้นที่หน้าตัดของทองแดงน้อยกว่า ทำให้แท่งทองแดงตันจะสามารถรองรับกระแสได้สูงกว่าสาย AWG ดังนั้นแท่งที่จะต้องนำมาใช้นี้ต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 18.288 mm ในความเป็นจริงแล้วเราจำเป็นต้องลดความสูญเสีย



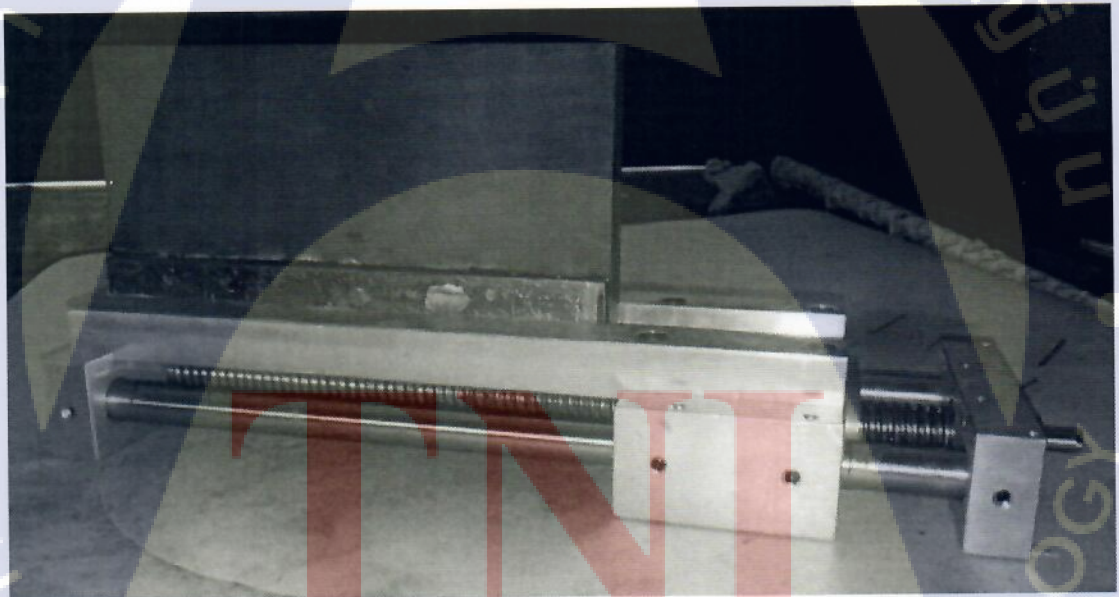
รูปที่ 4.7 ชุดติดตั้งขั้วไฟฟ้าแผ่นกราไฟต์แคโทด

พลังงานไฟฟ้าไปกับแท่งทองแดงให้น้อยที่สุด เส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนดดังกล่าวจึงเป็นเพียงขีดจำกัดล่างที่จะนำมาใช้

สำหรับการจัดสร้างชุดเชื่อมต่อแผ่นกราไฟต์แคโทด อยู่ในรูปที่ 4.7 ประกอบด้วยแผ่นกราไฟต์แคโทด ขนาด $125 \times 250 \times 24$ mm โดยด้านล่างของแผ่นกราไฟต์จะถูกประกบด้วยแผ่นทองแดง เพื่อส่งผ่านกระแสไฟฟ้าจากสายเคเบิลไปยังแผ่นกราไฟต์แคโทด โดยแผ่นทองแดงและแผ่นกราไฟต์นั้นก่อนติดตั้งเข้ากับฐานรองรับโลหะ จะต้องถูกฉนวนไว้ด้วยฉนวนที่เป็นวัสดุเทฟลอน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลไปสู่ตัวถังปฏิกรณ์โดยตรง การเลือกใช้วัสดุเทฟลอนเป็นฉนวนเนื่องจากสามารถตัดกึ่งได้ง่าย และมีจุดหลอมเหลวที่สูงถึง 327 องศาเซลเซียส ที่สามารถทนต่อความร้อนที่ถูกนำมาจากอาร์คของแผ่นกราไฟต์ได้ โดยชุดขั้วไฟฟ้าแผ่นกราไฟต์แคโทดนั้นจะถูกติดตั้งกับ Linear axis แกนนอน ดังรูป 4.8 และ รูป 4.9



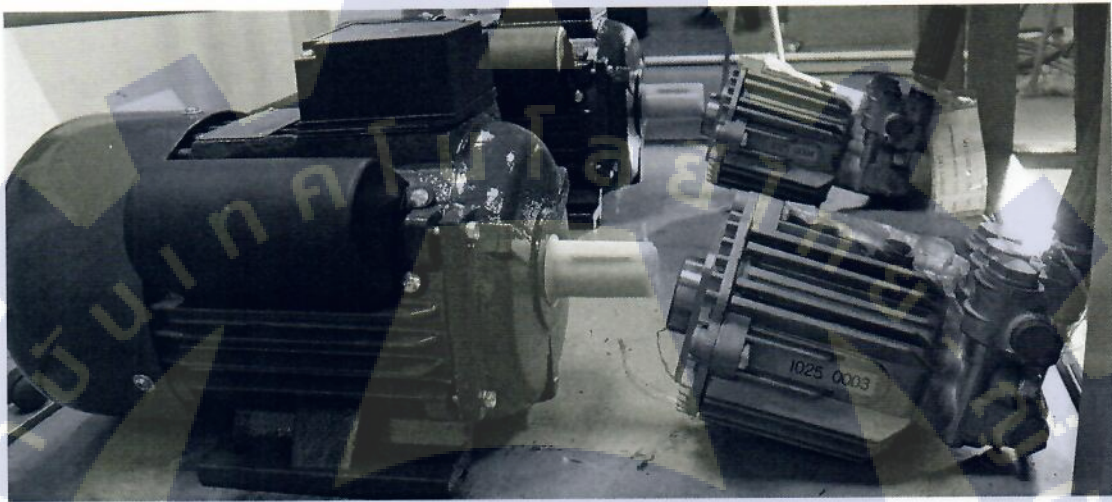
รูปที่ 4.8 ด้านบนของ Linear axis แกนนอน ติดตั้งไว้กับชุดขับเคลื่อนไฟฟ้าแผ่นกราฟต์เคโทด



รูปที่ 4.9 ด้านข้างของ Linear axis แกนนอน ติดตั้งไว้กับชุดขับเคลื่อนไฟฟ้าแผ่นกราฟต์เคโทด

4.3 การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตและเครื่องมือวัด ภายนอกถึงปฏิกรณ์ ระยะที่ 1

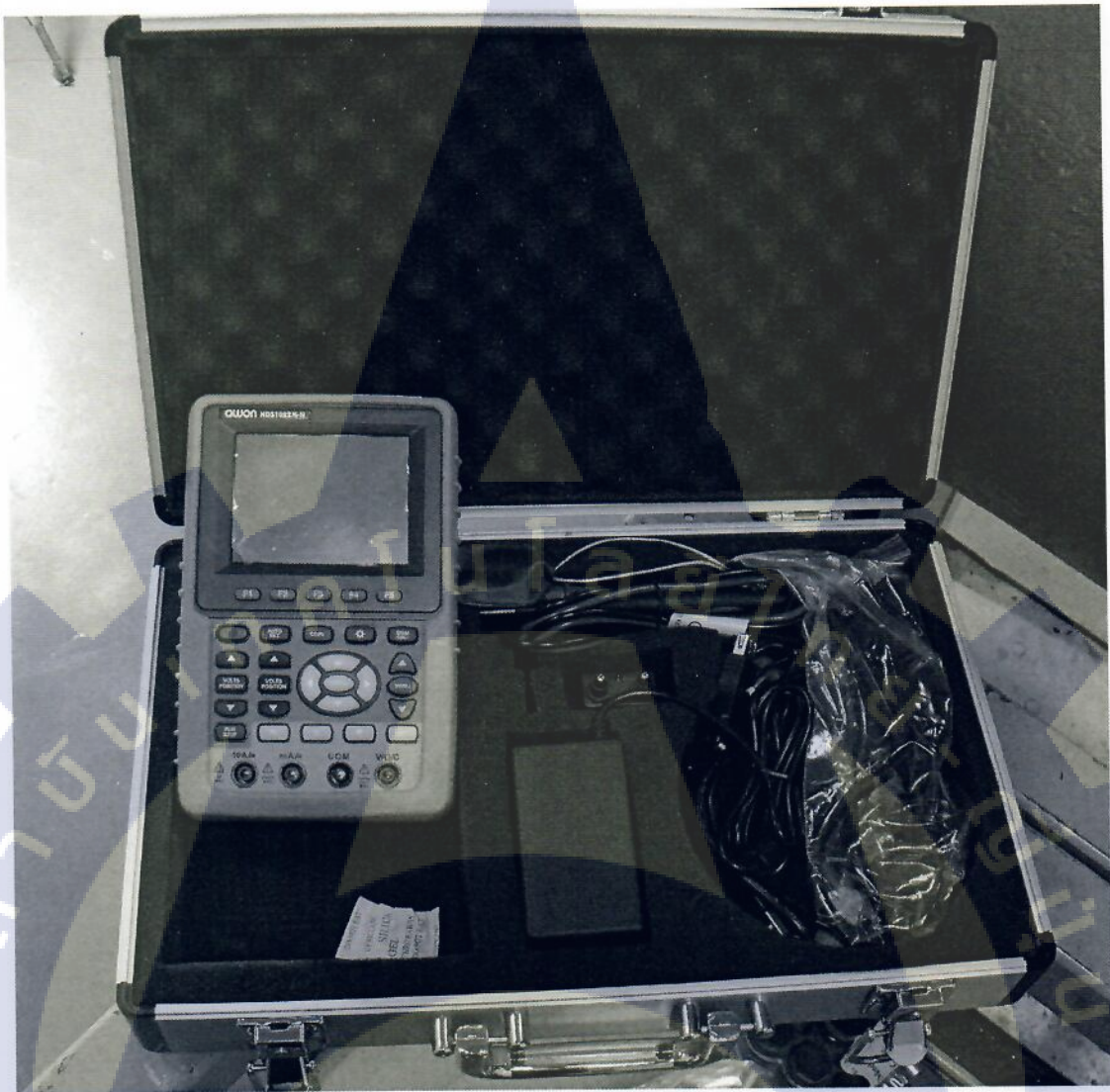
การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตและเครื่องมือวัด ในระยะที่ 1 นี้จะเตรียมเฉพาะอุปกรณ์หลัก ๆ ที่สำคัญคือ ชุดปั๊มของเหลวแรงดันสูงที่มีคุณภาพ จำนวน 2 ชุด และ ออสซิลโลสโคปแบบพกพา เพื่อใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้า และอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ Linear axis



รูปที่ 4.10 ชุดปั๊มของเหลวประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 KW และ หัวปั๊มแรงดันสูง

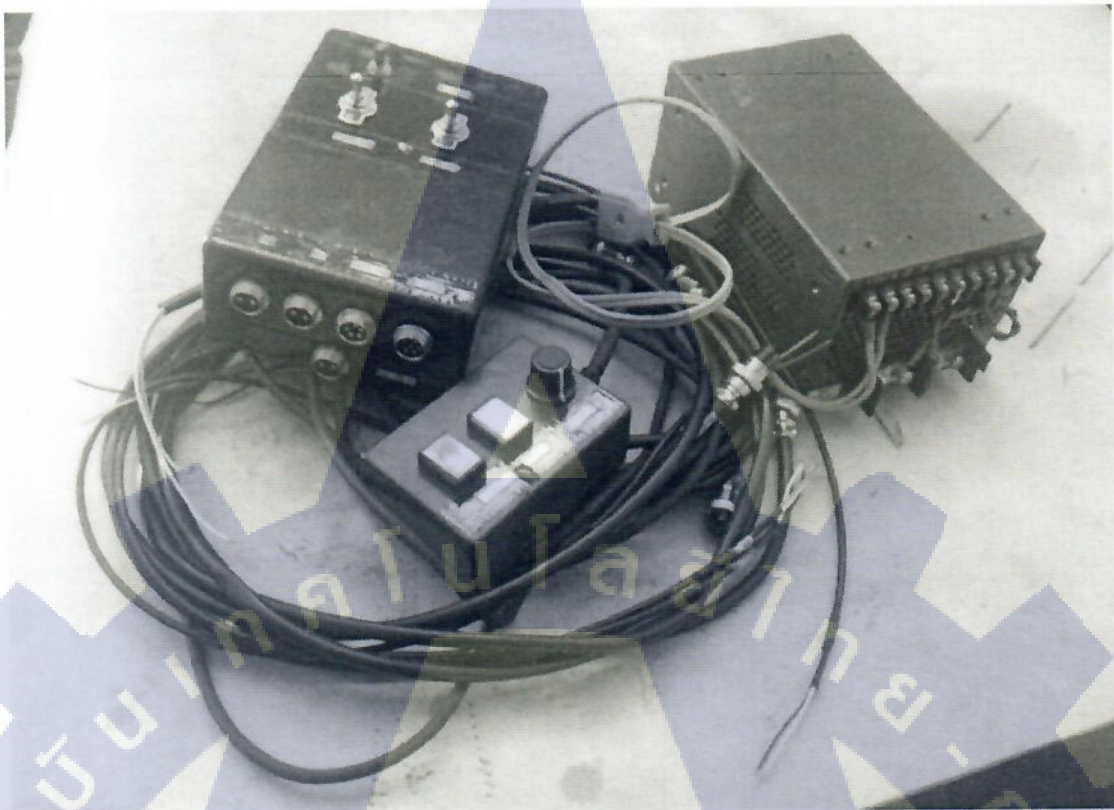
ปั๊มของเหลวแรงดันสูงที่มีคุณภาพ ที่สามารถใช้กับของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำมันได้ ในงานวิจัยนี้ได้จัดเตรียมมอเตอร์ไฟฟ้า 2 เฟส 2 HP และหัวปั๊มรุ่น ANNOVI Model. XJS 11.14 2 POLE ขนาดเพลต 24 mm จำนวน 2 ชุด ดังรูป 4.10 โดยหัวปั๊ม ANNOVI รุ่นนี้เป็นรุ่นที่มีคุณภาพและสามารถทนความดันได้ถึง 140 bar โดยปั๊มของเหลวให้มีอัตราการไหลได้ถึง 11 L/min โดยใช้เป็นปั๊มของเหลวกระบวนการผลิตก๊าซ P-1 และ P-2 ตามแผนผังกระบวนการในรูปที่ 3.4

อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่สำคัญอีกตัวหนึ่งก็คือ อุปกรณ์วัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต ที่ประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ไปสำหรับการอาร์คไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปกับปั๊มและอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งนี้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในการอาร์คไฟฟ้าได้นี้ จะเป็นพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง คิดเป็นประมาณ 95% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมด โดยค่าพลังงานไฟฟ้าจากการอาร์คจะวัดเฉพาะส่วนกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์เท่านั้น จึงจะได้ค่าพลังงานในการอาร์คที่ถูกต้องแน่นอนและนำไปใช้เป็นประโยชน์ได้ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่จ่าย



รูปที่ 4.11 ออสซิลโลสโคปแบบพกพา 20 MHz

กระแสไฟฟ้าสำหรับการอาร์คนั้น แต่ละยี่ห้อหรือรุ่นก็จะมีประสิทธิภาพไม่เท่ากัน ที่ต้องแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้สูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปส่วนหนึ่ง ทั้งนี้ในขณะที่อาร์คไฟฟ้าค่าประสิทธิภาพในการแปลงกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ก็อาจไม่คงที่ ดังนั้นเราจำเป็นต้องวัดค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ก่อนส่งผ่านไปให้ขั้วไฟฟ้าแผ่นคาร์บอนเท่านั้น การจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้า จะต้องสามารถวัดค่าพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงได้ ในที่นี้ได้จัดเตรียมออสซิลโลสโคปแบบพกพา OWON SCOPEMETER รุ่น HDS1022M-N 20 MHz ที่สามารถบันทึกค่าโวลเตจ และกระแสได้ในเวลาเดียวกันทำให้เราสามารถคำนวณค่าพลังงานได้อย่างถูกต้องแน่นอนได้ ดังรูป 4.11



รูปที่ 4.12 ชุดอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์สำหรับ Linear axis แกนตั้งและแกนนอน

ในส่วนของผู้ควบคุมมอเตอร์ Linear axis แกนนอนและแกนตั้งนั้น จัดทำขึ้นให้อยู่ภายในกล่องควบคุมมอเตอร์ตัวเดียวกัน โดย ชุดอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ที่จัดทำขึ้นอยู่ในรูป 4.12 ในส่วนของมอเตอร์ Linear axis แกนนอน จะควบคุมให้ขั้วไฟฟ้าแผ่นกราฟต์แคโทด เคลื่อนที่ไปมา แบบอัตโนมัติ โดยจะทำให้เกิดการอาร์คจากขอบด้านบนของแผ่นกราฟต์จากซ้ายสุด ไปขวาสุด และเคลื่อนที่กลับมาซ้ายสุดอีกครั้ง เป็นรอบเวลาต่อเนื่องไป กล่องควบคุมมอเตอร์ในรูป 4.12 จะมีโวลุ่ม ที่สามารถปรับให้ความเร็วของมอเตอร์ Linear axis แกนนอน ให้อัตราการเคลื่อนที่ของแผ่นกราฟต์แคโทดเหมาะสม กับการอาร์คไฟฟ้าได้น้ำที่ให้ได้การอาร์คอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการควบคุมจุดกลับตัวของขั้วไฟฟ้าแผ่นกราฟต์แคโทดจะถูกควบคุมจาก ลิimitsวิตช์ หรือ พร็อกซิมิตี้ สวิตช์ (Proximity Switch) ที่ต่ออยู่กับลีดสกรู (lead screw) ด้านนอกของฝาถังปฏิกรณ์ แกนนอนในรูปที่ 3.2 ที่สามารถบอกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ Linear axis แกนนอน ภายในถังปฏิกรณ์ได้

ในส่วนของการควบคุมมอเตอร์ Linear axis แกนตั้งนั้น จะเป็นการควบคุมแบบ แมนนวล เนื่องจาก จะสร้างอุปกรณ์ควบคุมแบบอัตโนมัติได้นั้นเราจำเป็นต้องเรียนรู้วิธีการอาร์คได้น้ำ รวมถึงปัจจัยจากตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องที่สามารถทำให้การอาร์คไฟฟ้าได้น้ำเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 ทั้งนี้ที่กล่องควบคุมมอเตอร์จะมีสายเชื่อมต่อกับ handheld ที่มี โวลุ่มปรับความเร็วมอเตอร์ Linear axis แกนตั้ง และปุ่มกดติดปล่อยดับ 2 ปุ่ม สวิตซ์ตัวแรกเมื่อกดปุ่มค้างไว้ จะทำให้แผ่นกราไฟต์แอโนดเลื่อนขึ้น และเมื่อปล่อยจะหยุด สำหรับสวิตซ์ตัวที่สองนั้น เมื่อกดปุ่มค้างไว้ จะทำให้แผ่นกราไฟต์แอโนดเลื่อนลง และเมื่อปล่อยจะหยุด โดย Linear axis แกนตั้งนั้นเมื่อหมุนไป รอบจะทำให้แผ่นกราไฟต์แอโนดเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง 4.721 mm

จากการทดสอบจริงในเบื้องต้น โดยติดตั้ง Linear axis แกนตั้ง ที่มีระยะเคลื่อนที่ 4.721 mm ต่อการหมุนแกน 1 รอบ เชื่อมกับคัปปลิงฟ้างปฏิกรณ์ด้านบน ที่ติดตั้งมู่และสายพานที่มีอัตราทด 2 : 1 ไว้กับดีซีเซอร์โวมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบสูงสุด 150 rpm ทั้งนี้เมื่อต่อสายควบคุมมอเตอร์เข้ากับกล่องควบคุม โดยปรับโวลุ่ม ให้มอเตอร์มีความเร็วให้น้อยที่สุดที่ยังคงหมุนได้ พบว่า เมื่อกดปุ่มที่ handheld อย่างรวดเร็ว จะทำให้แกน Linear axis หมุนไป 9 องศา ที่จะทำให้แผ่นกราไฟต์แอโนดเคลื่อนที่ไป 118 μm จากระยะการเคลื่อนที่ดังกล่าว จะเห็นได้ว่าเราสามารถควบคุมให้แผ่นกราไฟต์เคลื่อนที่ด้วยสเกลที่น้อย ๆ ได้ในระดับไมโครเมตรได้ เพื่อควบคุมการอาร์คไฟฟ้าให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องได้ อย่างไรก็ตามเราสามารถทำให้ระยะการเคลื่อนที่แนวแกนตั้งมีความละเอียดสูงขึ้นได้อีก โดยใช้ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบต่ำลง เพื่อควบคุมให้การอาร์คไฟฟ้าได้น้ำมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้การควบคุมแบบอัตโนมัติ สามารถทำได้ต่อไปเมื่อศึกษาและวิจัยวิธีการอาร์คไฟฟ้าได้น้ำแบบต่อเนื่อง นำข้อมูลของโวลต์เตจและกระแสไฟฟ้ามารวบรวม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซที่ดีที่สุด จึงจะสามารถนำมาสู่วิธีการควบคุมมอเตอร์ Linear axis แกนตั้งแบบอัตโนมัติได้ และสร้างชุดเซนเซอร์พร้อมทั้งเขียน โปรแกรม PLC ต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลและงานวิจัยถัดไป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบ เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คใต้ของเหลว ต้นแบบสำหรับหับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมจริงได้ต่อไป เริ่มจากการออกแบบตัวทำปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คใต้ของเหลวให้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถบำบัดของเหลวไปได้ในตัว ทั้งนี้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงถูกออกแบบให้ ถึงปฏิกิริยาสามารถรองรับความดันได้สูงสุด 20 bar ใช้กำลังไฟฟ้าในการอาร์คใต้ของเหลว 20 KW ที่ทำให้ได้อัตราการผลิตก๊าซ 227 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องเปลี่ยนแผ่นกราไฟต์หรือซ่อมบำรุงเป็นระยะเวลา 1-2 สัปดาห์ รวมถึงวิธีการซ่อมบำรุงที่ง่ายและปลอดภัย ทั้งนี้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่น ต่อการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตได้ เพียงเปลี่ยนขนาดของแผ่นกราไฟต์แคโทดและแอโนดให้หนาขึ้น โดยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ออกแบบไว้ สามารถรองรับกำลังไฟฟ้าในการอาร์คใต้ของเหลวได้สูงสุด 150 KW ที่อัตราการผลิตก๊าซ 1,700 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง เพียงพอต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก

โดยการผลการดำเนินงานในระยะที่ 1 นั้น ได้มีการจัดเตรียมและสร้างขึ้นส่วน อุปกรณ์ที่สำคัญ ๆ ประกอบด้วย ถึงปฏิกิริยา แกน Linear axis ชุดติดตั้งขั้วไฟฟ้าแผ่นกราไฟต์แคโทดและแอโนด เกจวัดความดัน เกจวัดอุณหภูมิ เกจวัดอัตราการไหล อุปกรณ์วัดระดับของเหลว แท่งทองแดง ชุดปั๊มของเหลวแรงดันสูง เครื่องมือวัดค่าพลังงานไฟฟ้า และ ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ แกน Linear axis พร้อมแบบแปลน ของถึงปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คใต้ของเหลว ที่เชื่อมต่อกับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้งหมด รวมถึงแผนผังกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เพื่อที่จะสามารถดำเนินการ จัดสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพลาสมาอาร์คใต้ของเหลวได้ต่อไป งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาทฤษฎี ที่จะนำไปใช้ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยวิธีพลาสมาอาร์คใต้ของเหลว คือ การคัสซาร์จไฟฟ้าในฉนวนเหลว hadronic chemistry และการคำนวณสัมประสิทธิ์สมรรถนะด้วยวิธีทางเคมี เพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์หาวิธีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมถึงสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

5.2 งานวิจัยถัดไป

1. จัดสร้างชิ้นส่วนสำหรับเชื่อมต่อ แกน Linear axis ลีดสกร มอเตอร์ เกจวัดความดัน เกจวัดอุณหภูมิ อุปกรณ์วัดระดับของเหลว แท่งทองแดง ติดตั้งเข้ากับฝาถังปฏิกรณ์ และติดตั้งรางเลื่อนแกนนอนในถังปฏิกรณ์ ตามที่ได้ออกแบบไว้
2. จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่ยังขาดอยู่ คือ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน कुलिंगทาวเวอร์ มิเตอร์วัดปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง วาล์วของเหลว วาล์วก๊าซ Pressure Relief Valve ท่อ ถึงเก็บของเหลว ตัวกรอง และประกอบเข้าด้วยกันตามแผนผังกระบวนการที่ออกแบบไว้
3. จัดสร้างตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า เพื่อควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิต ที่จะต้องควบคุมปั๊มของเหลว วาล์ว เบรกเกอร์ และมิเตอร์วัดค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ
4. เชื่อมต่อตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า กล่องควบคุมมอเตอร์ เข้ากับอุปกรณ์ของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง
5. ทดสอบระบบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง หาวิธีที่ทำให้การอาร์คไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งบันทึกค่า โวลเตจของไฟฟ้าที่ใช้อาร์ค สำหรับนำไปวิเคราะห์หาวิธี ที่ใช้ในการควบคุมการอาร์คได้ของเหลวแบบอัตโนมัติได้ต่อไป
6. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ของเครื่องผลิต ที่เทียบกับตัวแปร ต่าง ๆ ในการผลิต คือ ชนิดของเหลว กำลังไฟฟ้าที่ใช้ ความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลของเหลว ความเร็วการเคลื่อนที่กราไฟต์แคโทด ทั้งแบบ Total Refineries และ Linear Refineries
7. นำก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบของไอเสียเมื่อเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิง และวัดค่าความจุพลังงาน

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บรรณานุกรม

- [1] “ปรีรัฐต้องปลดล็อก พลังงานทดแทน” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
(<http://www.manager.co.th/iBizchannel/viewNews.aspx?NewsID=9560000055588>). 2556
- [2] “สถิติพลังงานของประเทศไทย 2555” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : (www.dede.go.th). 2556
- [3] “การจัดหาและจัดจำหน่ายก๊าซธรรมชาติ” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
(<http://www.pttplc.com/th/About/Business/PTT-Owned-Business/Gas-Unit/Pages/natural-gas-procurement.aspx>). 2556
- [4] “รู้ให้ทัน ต้องเข้าใจ LPG” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
(http://www.pttplc.com/th/Media-Center/Energy-Knowledge/KnowledgeLibrary/Natural%20Gas%20Knowledge/LPG_BOOKLET.pdf). 2556
- [5] R. M. Santilli and A. K. Aringazin, “Structure and Combustion of Magnegases”, *Hadronic J.* 27, pp. 299-330, 2004.
- [6] R. M. Santilli and A. K. Aringazin, “A Study of the Energy Efficiency of Hadronic Reactors of Molecular Type”, *Hadronic J.* 27, pp. 273-298, 2004.
- [7] ร้อยตรี ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต, “เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากพลังงานไฟฟ้าและชีวมวล” กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2551
- [8] Ruggero Maria Santilli, “Hadronic Mathematices, and Mechanic Chemistry Volume. V”. (<http://www.i-b-r.org/ir00022.htm>). 2008.
- [9] วิเชียร เบญจวัฒนผล, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2539

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ภาคผนวก

TNI

SPECIFICATIONS FOR STEEL PIPE

Published pipe standards serve three functions.

1. They dictate manufacturing and testing requirements and prescribed methods of measuring the required mechanical and physical properties.
2. Without specifications, it would be difficult for the pipe buyer to establish a common ground of understanding with the producer as to product requirements.
3. When the pipe producer marks a specification on this product they warrant that the pipe is made from prime quality steel and meets all the requirements of the specification.

Standard pipe is manufactured and tested as prescribed by ASTM (formerly American Society for Testing Materials), an international, non-profit technical and Scientific organization formed for "the consensus development of standards on characteristics and performance of materials, products, systems and services." The society operates through more than 127 main technical committees. These committees function under regulations that ensure balanced representation among producers, users and general interest groups. The published standards, therefore, represent the consensus viewpoint of all involved. Line pipe and Oil Country products are manufactured and tested as prescribed by the American Petroleum Institute (API). The API operates similarly to the ASTM except that producers, consumers, and associations with primary interests in oil or gas are involved.

GRADE

Grade refers to divisions within different types of seamless and ERW pipe and designates mechanical properties such as minimum yield and tensile strengths. Grade B has higher tensile and yield strength than Grade A. It is manufactured to higher carbon content steel. Grade A, being a softer steel, is easier to bend and is recommended for use in close coiling and cold bending. Grade B has higher stress values and is better suited for machining operations. Grade C, which is available in ASTM-106, has higher tensile and yield strength than Grades A & B.

DIMENSIONS

Many changes have been made to ASTM specifications over the years. One of the more recent has been to make the specifications fit with metric, and more correctly, with the measurements of pipe and the related fittings.

To change the pipe outside diameter (OD) and wall thickness, simply multiply the SI dimensions by the appropriate factor to convert to metric. However, an inch is not a real inch. Nowhere on pipe 12" and smaller is there a corresponding measurement because this size has no real numerical value.

To solve this problem and still retain the intent of the size designation, the inch mark was removed from the column showing the size, and the term NPS was added as were the following words: The dimensionless designator NPS (nominal pipe size) has been substituted in this standard for such traditional terms as "nominal diameter," "size," and "nominal size." They are now stated as NPS 1, NPS 2, NPS 6, NPS 12, NPS 14, etc.

WARNING

Most pipe specifications are restricted by tolerances for outside diameter, wall thickness, and weight. Pipe must meet all three criteria or material could be rejected. Please refer to the applicable specifications.

DIGEST OF COMMON - PIPE SPECIFICATIONS

Specification and Size Range Where Indicated	Scope	Type	Grades	Chemistry																																																																																																																					
A-120 (has been withdrawn) NPS 1/8 - 16	Blk & Galv Welded & SMLS pipe for ordinary use - not Intended for close coiling bending or high temperature service	CW ERW SMLS	None Specified	None Specified																																																																																																																					
A-53 NPS 1/8 - 26	Blk & Galv Welded & SMLS pipe suitable for welding and forming operations CW not intended for flanging. Grade B not intended for close coiling or severe cold forming. Pipe required for close coiling should be specified on order.	CW - Type F ERW - Type E SMLS - Type S	CW - Type F ERW & SMLS Grade A & B	Composition, max % <table><thead><tr><th></th><th>C</th><th>Mg</th><th>P</th><th>S</th></tr></thead><tbody><tr><td colspan="5">Type S (seamless pipe)</td></tr><tr><td>Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Grade A</td><td>0.25</td><td>.095</td><td>0.05</td><td>0.045</td></tr><tr><td>Grade B</td><td>0.30</td><td>1.20</td><td>0.05</td><td>0.045</td></tr><tr><td colspan="5">Type E (electric resistance welded)</td></tr><tr><td>Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Grade A</td><td>0.25</td><td>.095</td><td>0.05</td><td>0.045</td></tr><tr><td>Grade B</td><td>0.30</td><td>1.20</td><td>0.05</td><td>0.045</td></tr><tr><td colspan="5">Type F (furnace welded pipe)</td></tr><tr><td>Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:</td><td>0.30</td><td>1.20</td><td>0.05</td><td>0.045</td></tr></tbody></table> Ladle and Check Limits		C	Mg	P	S	Type S (seamless pipe)					Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:					Grade A	0.25	.095	0.05	0.045	Grade B	0.30	1.20	0.05	0.045	Type E (electric resistance welded)					Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:					Grade A	0.25	.095	0.05	0.045	Grade B	0.30	1.20	0.05	0.045	Type F (furnace welded pipe)					Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:	0.30	1.20	0.05	0.045																																																														
	C	Mg	P	S																																																																																																																					
Type S (seamless pipe)																																																																																																																									
Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:																																																																																																																									
Grade A	0.25	.095	0.05	0.045																																																																																																																					
Grade B	0.30	1.20	0.05	0.045																																																																																																																					
Type E (electric resistance welded)																																																																																																																									
Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:																																																																																																																									
Grade A	0.25	.095	0.05	0.045																																																																																																																					
Grade B	0.30	1.20	0.05	0.045																																																																																																																					
Type F (furnace welded pipe)																																																																																																																									
Open-hearth, electric-furnace or basic-oxygen:	0.30	1.20	0.05	0.045																																																																																																																					
A-106 NPS 1/8 - 26	SMLS for high temperature service. Suitable for bending, flanging, and similar forming operations.	SMLS Only	Grades A, B & C	Composition, max % <table><thead><tr><th>Element*</th><th>Grade A</th><th>Grade B</th><th>Grade C</th></tr></thead><tbody><tr><td>Chromium</td><td>0.40</td><td>0.40</td><td>0.40</td></tr><tr><td>Copper</td><td>0.40</td><td>0.40</td><td>0.40</td></tr><tr><td>Molybdenum</td><td>0.15</td><td>0.15</td><td>0.15</td></tr><tr><td>Nickel</td><td>0.40</td><td>0.40</td><td>0.40</td></tr><tr><td>Vanadium</td><td>0.08</td><td>0.08</td><td>0.08</td></tr></tbody></table> *These five elements combined shall not exceed 1%.	Element*	Grade A	Grade B	Grade C	Chromium	0.40	0.40	0.40	Copper	0.40	0.40	0.40	Molybdenum	0.15	0.15	0.15	Nickel	0.40	0.40	0.40	Vanadium	0.08	0.08	0.08																																																																																													
Element*	Grade A	Grade B	Grade C																																																																																																																						
Chromium	0.40	0.40	0.40																																																																																																																						
Copper	0.40	0.40	0.40																																																																																																																						
Molybdenum	0.15	0.15	0.15																																																																																																																						
Nickel	0.40	0.40	0.40																																																																																																																						
Vanadium	0.08	0.08	0.08																																																																																																																						
A-135 NPS 2-30	Electric resistance welded for conveying fluid, gas or vapor.	ERW Only	Grades A & B	% max <table><thead><tr><th>Element</th><th>Grade A</th><th>Grade B</th></tr></thead><tbody><tr><td>Carbon</td><td>0.25</td><td>0.30</td></tr><tr><td>Manganese</td><td>0.95</td><td>1.20</td></tr><tr><td>Phosphorus</td><td>0.035</td><td>0.035</td></tr><tr><td>Sulfur</td><td>0.035</td><td>0.035</td></tr></tbody></table> Ladle and check limits	Element	Grade A	Grade B	Carbon	0.25	0.30	Manganese	0.95	1.20	Phosphorus	0.035	0.035	Sulfur	0.035	0.035																																																																																																						
Element	Grade A	Grade B																																																																																																																							
Carbon	0.25	0.30																																																																																																																							
Manganese	0.95	1.20																																																																																																																							
Phosphorus	0.035	0.035																																																																																																																							
Sulfur	0.035	0.035																																																																																																																							
A-252 NPS 6 - 24	ERW or SMLS for Pipe Piles	ERW SMLS DSAW	Grades 1, 2, 3	All grades .05 Max. % Phos. Ladle & check limits																																																																																																																					
A-333	SMLS & Welded Carbon & Alloy Steel pipe for low temperature service	SMLS ERW	1, 3, 4, 6, 7, 8, 9	% max <table><thead><tr><th>GR</th><th>C</th><th>MN</th><th>P</th><th>S</th><th>SI</th><th>NI</th><th>CR</th><th>CU</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>30</td><td>40-105</td><td>.025</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>3</td><td>19</td><td>31-84</td><td>.025</td><td>.025</td><td>18-37</td><td>318-382</td><td></td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>12</td><td>50-105</td><td>.025</td><td>.025</td><td>08-</td><td>47-98</td><td>44-101</td><td>40-75</td></tr><tr><td>6</td><td>30</td><td>29-105</td><td>.025</td><td>.025</td><td>10min</td><td></td><td></td><td>04-20</td></tr><tr><td>7</td><td>10</td><td>90 max</td><td>.025</td><td>.025</td><td>13-32</td><td>203-257</td><td></td><td></td></tr><tr><td>8</td><td>13</td><td>90 max</td><td>.025</td><td>.025</td><td>13-</td><td>840-960</td><td></td><td></td></tr><tr><td>9</td><td>20</td><td>40-</td><td>.025</td><td>.025</td><td></td><td>180-224</td><td>75-125</td><td></td></tr><tr><td>10</td><td>20</td><td>1.15-150</td><td>.035</td><td>.018</td><td>10-36</td><td>25 max</td><td>15 max</td><td>06</td></tr><tr><td>11</td><td>10</td><td>0.90 max</td><td>.025</td><td>.025</td><td>0.36 max</td><td>35.0-37.0</td><td>50 max</td><td></td></tr></tbody></table>	GR	C	MN	P	S	SI	NI	CR	CU	1	30	40-105	.025						3	19	31-84	.025	.025	18-37	318-382			4	12	50-105	.025	.025	08-	47-98	44-101	40-75	6	30	29-105	.025	.025	10min			04-20	7	10	90 max	.025	.025	13-32	203-257			8	13	90 max	.025	.025	13-	840-960			9	20	40-	.025	.025		180-224	75-125		10	20	1.15-150	.035	.018	10-36	25 max	15 max	06	11	10	0.90 max	.025	.025	0.36 max	35.0-37.0	50 max																												
GR	C	MN	P	S	SI	NI	CR	CU																																																																																																																	
1	30	40-105	.025																																																																																																																						
3	19	31-84	.025	.025	18-37	318-382																																																																																																																			
4	12	50-105	.025	.025	08-	47-98	44-101	40-75																																																																																																																	
6	30	29-105	.025	.025	10min			04-20																																																																																																																	
7	10	90 max	.025	.025	13-32	203-257																																																																																																																			
8	13	90 max	.025	.025	13-	840-960																																																																																																																			
9	20	40-	.025	.025		180-224	75-125																																																																																																																		
10	20	1.15-150	.035	.018	10-36	25 max	15 max	06																																																																																																																	
11	10	0.90 max	.025	.025	0.36 max	35.0-37.0	50 max																																																																																																																		
A-335 NPS 1/8 - 26	SMLS Alloy Steel Pipe for high temperature service	SMLS Only	P1, P2, P5, P5b, P5c, P9, P11, P12, P15, P21, P22, P91	<table><thead><tr><th>Grade</th><th>UNS Des.</th><th>C</th><th>Mg</th><th>P max</th><th>S max</th><th>Si</th><th>Cr</th><th>Mo</th></tr></thead><tbody><tr><td>P1</td><td>K11522</td><td>10-20</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>10-50</td><td></td><td>44-65</td></tr><tr><td>P2</td><td>K11547</td><td>10-20</td><td>30-61</td><td>.025</td><td>.025</td><td>10-30</td><td>5-81</td><td>44-65</td></tr><tr><td>P5</td><td>K41545</td><td>15max</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>50max</td><td>4-6</td><td>45-65</td></tr><tr><td>P5b</td><td>K51545</td><td>15max</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>105-200</td><td>4-6</td><td>45-65</td></tr><tr><td>P5c</td><td>K41265</td><td>12max</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>50max</td><td>4-6</td><td>45-65</td></tr><tr><td>P9</td><td>S30400</td><td>15max</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>25-100</td><td>8-10</td><td>80-110</td></tr><tr><td>P11</td><td>K11507</td><td>05-15</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>50-100</td><td>1-15</td><td>44-65</td></tr><tr><td>P12</td><td>K11582</td><td>05-15</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>50max</td><td>80-125</td><td>44-65</td></tr><tr><td>P15</td><td>K11578</td><td>05-15</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>115-165</td><td></td><td>44-65</td></tr><tr><td>P21</td><td>K31545</td><td>05-15</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>50max</td><td>2.65-3.25</td><td>80-106</td></tr><tr><td>P22</td><td>K21500</td><td>05-15</td><td>30-60</td><td>.025</td><td>.025</td><td>50max</td><td>1.92-5</td><td>87-113</td></tr><tr><td>P91</td><td>K91580</td><td>08-12</td><td>30-60</td><td>.020</td><td>.010</td><td>20-50</td><td>8-9.5</td><td>85-105</td></tr></tbody></table> a. New designation established in accordance with Practice E-527 and SAE J1086. Practice for Numbering Metals and Alloys (UNS). b. Grade P5c shall have a titanium content of not less than 4 times the carbon content and not more than 0.70% or a	Grade	UNS Des.	C	Mg	P max	S max	Si	Cr	Mo	P1	K11522	10-20	30-60	.025	.025	10-50		44-65	P2	K11547	10-20	30-61	.025	.025	10-30	5-81	44-65	P5	K41545	15max	30-60	.025	.025	50max	4-6	45-65	P5b	K51545	15max	30-60	.025	.025	105-200	4-6	45-65	P5c	K41265	12max	30-60	.025	.025	50max	4-6	45-65	P9	S30400	15max	30-60	.025	.025	25-100	8-10	80-110	P11	K11507	05-15	30-60	.025	.025	50-100	1-15	44-65	P12	K11582	05-15	30-60	.025	.025	50max	80-125	44-65	P15	K11578	05-15	30-60	.025	.025	115-165		44-65	P21	K31545	05-15	30-60	.025	.025	50max	2.65-3.25	80-106	P22	K21500	05-15	30-60	.025	.025	50max	1.92-5	87-113	P91	K91580	08-12	30-60	.020	.010	20-50	8-9.5	85-105
Grade	UNS Des.	C	Mg	P max	S max	Si	Cr	Mo																																																																																																																	
P1	K11522	10-20	30-60	.025	.025	10-50		44-65																																																																																																																	
P2	K11547	10-20	30-61	.025	.025	10-30	5-81	44-65																																																																																																																	
P5	K41545	15max	30-60	.025	.025	50max	4-6	45-65																																																																																																																	
P5b	K51545	15max	30-60	.025	.025	105-200	4-6	45-65																																																																																																																	
P5c	K41265	12max	30-60	.025	.025	50max	4-6	45-65																																																																																																																	
P9	S30400	15max	30-60	.025	.025	25-100	8-10	80-110																																																																																																																	
P11	K11507	05-15	30-60	.025	.025	50-100	1-15	44-65																																																																																																																	
P12	K11582	05-15	30-60	.025	.025	50max	80-125	44-65																																																																																																																	
P15	K11578	05-15	30-60	.025	.025	115-165		44-65																																																																																																																	
P21	K31545	05-15	30-60	.025	.025	50max	2.65-3.25	80-106																																																																																																																	
P22	K21500	05-15	30-60	.025	.025	50max	1.92-5	87-113																																																																																																																	
P91	K91580	08-12	30-60	.020	.010	20-50	8-9.5	85-105																																																																																																																	
A-501 Square & Rectangular 1" - 10" Round 1" - 24"	Hot Formed Welded & SMLS Round, Square & Rectangular Tubing	SMLS Welded	None Specified	Composition % <table><thead><tr><th>Element</th><th>Heat Analysis</th><th>Product Analysis</th></tr></thead><tbody><tr><td>Carbon, max.</td><td>0.26</td><td>0.30</td></tr><tr><td>Phosphorus, max.</td><td>0.035</td><td>0.045</td></tr><tr><td>Sulfur, max.</td><td>0.035</td><td>0.045</td></tr><tr><td>Copper, min.*</td><td>0.20</td><td>0.18</td></tr></tbody></table> *When copper steel is specified	Element	Heat Analysis	Product Analysis	Carbon, max.	0.26	0.30	Phosphorus, max.	0.035	0.045	Sulfur, max.	0.035	0.045	Copper, min.*	0.20	0.18																																																																																																						
Element	Heat Analysis	Product Analysis																																																																																																																							
Carbon, max.	0.26	0.30																																																																																																																							
Phosphorus, max.	0.035	0.045																																																																																																																							
Sulfur, max.	0.035	0.045																																																																																																																							
Copper, min.*	0.20	0.18																																																																																																																							
A-587 NPS 1/2" - 10"	EW Pipe for process lines suitable for severe forming involving flanging and close bending	ERW Only	None Specified	% MAX. <table><thead><tr><th>C</th><th>MN</th><th>P</th><th>S</th><th>% MIN. AL</th></tr></thead><tbody><tr><td>.15</td><td>27-.63</td><td>.035</td><td>.035</td><td>.02-.11</td></tr></tbody></table>	C	MN	P	S	% MIN. AL	.15	27-.63	.035	.035	.02-.11																																																																																																											
C	MN	P	S	% MIN. AL																																																																																																																					
.15	27-.63	.035	.035	.02-.11																																																																																																																					
A-589 Type 1 NPS 6-16	SMLS & Welded Water Pipe Type 1 Drive Pipe	Type 1 SMLS or Welded	Type 1 A or B	% MAX. <table><thead><tr><th>P</th><th>S</th></tr></thead><tbody><tr><td>.050</td><td>.060</td></tr></tbody></table>	P	S	.050	.060																																																																																																																	
P	S																																																																																																																								
.050	.060																																																																																																																								

CONTINUED

DIGEST OF COMMON - PIPE SPECIFICATIONS

CONTINUED

Specification and Size Range Where Indicated	Tensiles	Hydrostatic	Tests Bend	Flattening	Wall Tolerance	OD Tolerance
A-120 (has been withdrawn) NPS 1/8 - 16	None Specified	yes	None Specified	None Specified	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall	1/2" - 1-1/2" + 1/64" -1/32" 2" & over +/- 1% of OD
A-53 NPS 1/8 - 26	MIN. P.S.I. Grade Yield Tensile C W 25,000 45,000 GR-A 30,000 48,000 GR-B 35,000 60,000	yes	yes - 2" & under Std. & XHY 90° to 12 times nom. diameter. Close coiling 180° to 8 times nom. dia.	yes - over 2" nom. XHY & lighter. CW 90° to 75% ODv	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall	1/2" - 1-1/2" + 1/64" -1/32" 2" & over +/- 1% of OD
A-106 NPS 1/8 - 26	MIN. P.S.I. Grade Yield Tensile A 30,000 48,000 B 35,000 60,000 C 40,000 70,000	yes	Not req'd over 2" diameter. 90° to 12 times dia. Close coiling 180° to 8 times diameter	yes - over 2" dia.	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall	1/8" - 1-1/2" + 1/64" -1/32" 2" - 4" +/- 1/32" 5" - 8" + 1/16" -1/32" 10" - 18" + 3/32" -1/32" 18" & over- 1/8" -1/32"
A-135 NPS 2-30	MIN. P.S.I. Grade Yield Tensile A 30,000 48,000 B 35,000 60,000	yes	None Specified	yes - for all sizes to 2/3 OD	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall	For all sizes +/- 1% of OD
A-252 NPS 6 - 24	MIN. P.S.I. Grade Yield Tensile 1 30,000 50,000 2 35,000 60,000 3 40,000 66,000	None Specified	None Specified	None Specified	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall. Surface defects no more than 25% deep	+/- 1% of OD
A-333	MIN. P.S.I. Grade Yield Tensile 1 30,000 50,000 2 35,000 65,000 3 35,000 60,000 6 35,000 60,000 7 35,000 65,000 8 75,000 100,000 9 46,000 63,000 10 65,000 80,000 11 35,000 65,000	yes	None Specified	yes - for all sizes	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall	2" - 4" +/- 1/32" 5" - 8" + 1/16" - 1/32" 10" - 18" + 3/32" - 1/32" 18" & + 1/8" Over - 1/32"
A-335 NPS 1/8 - 26	MIN. P.S.I. Grade Yield Tensile P1 30,000 55,000 P2 30,000 55,000 P-91 60,000 85,000 All Others 30,000 60,000	yes	yes	yes	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall	1/8" - 1-1/2" + 1/64" -1/32" 2" - 4" +/- 1/32" 4" - 8" + 1/16" - 1/32" 10" - 18" + 3/32" - 1/32" 20" - 26" + 1/8" -1/32"
A-501 Square & Rectangular 1" - 10" Round 1" - 24"	MIN. P.S.I. Yield Tensile 36,000 58,000	None Specified	Round None Shapes Yes	None Specified	None Specified Weight shall not be less than specified by more than 3.5%. Surface defect no more than 15%	Round: 1-1/2" & under + 1/65" - 1/32" 2" & over +/- 1% of OD Shapes: 2-1/2" & under +/- .020 2-1/2" - 3-1/2" +/- .025 3-1/2" - 5-1/2" +/- .030 5-1/2" & over +/- 1%
A-587 NPS 1/2" - 10"	MIN. P.S.I. Yield Tensile 30,000 48,000	None Specified Nondestructive test shall be made	None Specified A flange test shall be made	yes - for all sizes	Refer to table 4 ASTM Standards for A-587	Refer to table 4 ASTM Standards for A-587
A-589 Type 1 NPS 6-16	MIN. P.S.I. Grade Yield Tensile C W 25,000 45,000 A 30,000 48,000 B 35,000 60,000	yes	None Specified	None Specified	Min. wall shall not be more than 12.5% nominal wall	1-1/2" & under + 1/64" - 1/32" 2" & over +/- 1% of OD

DIGEST OF COMMON - PIPE SPECIFICATIONS (cont.)

Specification and Size Range Where Indicated	Scope	Type	Grades	Chemistry																																																																																			
Type II NPS 1-12	Type II Water well reamed and drifted	Type II SMLS, ERW or CW	Type II A or CW	<table><tr><th colspan="2">% MAX.</th></tr><tr><th>P</th><th>S</th></tr><tr><td>.050</td><td>.060</td></tr></table>	% MAX.		P	S	.050	.060																																																																													
% MAX.																																																																																							
P	S																																																																																						
.050	.060																																																																																						
Type III NPS 1-2	Type III Driven well pipe	Type III SMLS, ERW or CW	Type III A or CW																																																																																				
Type IV NPS 3-8	Type IV Water well casing	Type IV SMLS, ERW or CW	Type IV A or CW																																																																																				
API 5L	Welded and SMLS Line pipe	CW, ERW, SMLS DSAW	CW Grade 25 DSAW ERW & SMLS Grades A & B	<table><tr><th colspan="5">Ladle % Max</th></tr><tr><th>GR</th><th>C</th><th>MN</th><th>P</th><th>S</th></tr><tr><td>A-25</td><td>.21</td><td>.60</td><td>.08</td><td>.06</td></tr><tr><td>SMLS</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>A</td><td>.22</td><td>.90</td><td>.04</td><td>.05</td></tr><tr><td>B</td><td>.27</td><td>1.15</td><td>.04</td><td>.05</td></tr><tr><td>ERW</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>A</td><td>.21</td><td>.90</td><td>.04</td><td>.05</td></tr><tr><td>B</td><td>.26</td><td>1.15</td><td>.04</td><td>.05</td></tr></table>	Ladle % Max					GR	C	MN	P	S	A-25	.21	.60	.08	.06	SMLS					A	.22	.90	.04	.05	B	.27	1.15	.04	.05	ERW					A	.21	.90	.04	.05	B	.26	1.15	.04	.05																																						
Ladle % Max																																																																																							
GR	C	MN	P	S																																																																																			
A-25	.21	.60	.08	.06																																																																																			
SMLS																																																																																							
A	.22	.90	.04	.05																																																																																			
B	.27	1.15	.04	.05																																																																																			
ERW																																																																																							
A	.21	.90	.04	.05																																																																																			
B	.26	1.15	.04	.05																																																																																			
API 5LX	Welded and SMLS High test line pipe	ERW & SMLS DSAW	X-42 X-46 X-52 X-60 X-65 X-70 X-80	<table><tr><th colspan="6">Ladle % Max % Min</th></tr><tr><th>GR</th><th>C</th><th>MN</th><th>P</th><th>S</th><th>CB</th><th>V</th></tr><tr><td>SMLS</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-42</td><td>.29</td><td>1.25</td><td>.04</td><td>.05</td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-46</td><td>.31</td><td>1.35</td><td>.04</td><td>.05</td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-52</td><td>.31</td><td>1.35</td><td>.04</td><td>.05</td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-60</td><td>.26</td><td>1.35</td><td>.04</td><td>.05</td><td></td><td>.02</td></tr><tr><td>ERW</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-42</td><td>.28</td><td>1.25</td><td>.04</td><td>.05</td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-46</td><td>.30</td><td>1.35</td><td>.04</td><td>.05</td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-52</td><td>.30</td><td>1.35</td><td>.04</td><td>.05</td><td></td><td></td></tr><tr><td>X-60</td><td>.26</td><td>1.35</td><td>.04</td><td>.05</td><td>.005</td><td></td></tr></table>	Ladle % Max % Min						GR	C	MN	P	S	CB	V	SMLS							X-42	.29	1.25	.04	.05			X-46	.31	1.35	.04	.05			X-52	.31	1.35	.04	.05			X-60	.26	1.35	.04	.05		.02	ERW							X-42	.28	1.25	.04	.05			X-46	.30	1.35	.04	.05			X-52	.30	1.35	.04	.05			X-60	.26	1.35	.04	.05	.005	
Ladle % Max % Min																																																																																							
GR	C	MN	P	S	CB	V																																																																																	
SMLS																																																																																							
X-42	.29	1.25	.04	.05																																																																																			
X-46	.31	1.35	.04	.05																																																																																			
X-52	.31	1.35	.04	.05																																																																																			
X-60	.26	1.35	.04	.05		.02																																																																																	
ERW																																																																																							
X-42	.28	1.25	.04	.05																																																																																			
X-46	.30	1.35	.04	.05																																																																																			
X-52	.30	1.35	.04	.05																																																																																			
X-60	.26	1.35	.04	.05	.005																																																																																		
Federal WWP-406	Comparable to A-120 (has been withdrawn)																																																																																						
Federal WWP-404	Comparable to A-53																																																																																						

CONTINUED

ASTM & API SPECIFICATIONS WITH COMPARABLE ANSI DESIGNATIONS

ASTM OR API DESIGNATIONS	ANSI DESIGNATIONS		TITLE
	CURRENT	REPLACED	
ASTM A-53	B-125.1	B-36.1	Welded & Seamless pipe
ASTM A-106	B-125.30	B-36.3	Seamless carbon steel pipe for high temperature service
ASTM A-120*	B-125-2	B-36.20	Black & galvanized and seamless steel pipe for ordinary uses
ASTM A-134	B-125.55	B-36.4	Electric-fusion (Arc) welded steel plate pipe (sizes 16" & over)
ASTM A-135	B-125.3	B-36.5	Electric resistance welded pipe
ASTM A-139	B-125.31	B-36.9	Electric-fusion (Arc) welded steel plate pipe (sizes 4" & over)
ASTM A-155	B-125.4	B-36.11	Electric fusion welded steel pipe for high temperature service
ASTM A-211	B-125.56	B-36.16	"Insert discontinued 1994"
ASTM A-312	B-125.16	B-36.26	Seamless and welded austenitic stainless steel pipe
ASTM A-333	B-125.17	B-36.40	Seamless and welded steel pipe for low temperature service
ASTM A-335	B-124.24	B-36.42	Seamless ferritic alloy steel pipe for high temperature service

* has been withdrawn

DIGEST OF COMMON - PIPE SPECIFICATIONS

CONTINUED

Specification and Size Range Where Indicated	Tensiles			Hydrostatic	Tests Bend	Flattening	Wall Tolerance	OD Tolerance
Type II NPS 1-12	MIN. P.S.I.			yes	None Specified	None Specified	Min. wall shall not be more than 12.5% under nominal wall	1-1/2" & under + 1/64" - 1/32" 2" & over- +/- 1% of OD
	Grade	Yield	Tensile					
	C W	25,000	45,000					
	A	30,000	48,000					
Type III NPS 1-2	MIN. P.S.I.			yes	yes-for A-25 pipe 2-3/8" & smaller	yes	2-7/8" & smaller + 20% - 12.5%	1.900 & under + .016" - .031"
	Grade	Yield	Tensile					
	A-25	25,000	45,000					
	A	30,000	48,000					
Type IV NPS 3-8	MIN. P.S.I.			yes	None Specified	yes - for ERW	3-1/2" OD + 18% - 12.5%	2-38" - 4" OD +/- 1%
	Grade	Yield	Tensile					
	A	30,000	48,000					
	B	35,000	60,000					
API 5L	MIN. P.S.I.			yes	None Specified	yes - for ERW	4" - 18" + 15% - 12.5%	4-1/2" & over +/- .75%
	Grade	Yield	Tensile					
	X-42	42,000	60,000					
	X-46	46,000	63,000					
API 5LX	MIN. P.S.I.			yes	None Specified	yes - for ERW	20" & larger + 17.5% - 10%	+/- .75%
	Grade	Yield	Tensile					
	X-52	52,000	66,000					
	X-60	60,000	75,000					
Federal WWP-406	Comparable to A-120							
Federal WWP-404	Comparable to A-53							

ASTM & API SPECIFICATIONS WITH COMPARABLE ANSI DESIGNATIONS

ASTM A-358	B-125.57	B-36.47	Electric fusion welded austenitic chromium-nickel alloy steel pipe for high temperature service
ASTM A-369	B-125.77	B-36.48	Carbon & ferritic alloy steel forged and bored pipe for high temperature service
ASTM A-376	B-125-25	B-36.43	Seamless austenitic steel pipe for high temperature temperature central station service
ASTM A-381	B-125.25	B-36.49	Metal arc welded steel pipe for high pressure transmission systems
ASTM A-405	B-125.26	B-36.44	Seamless ferritic alloy steel pipe specially heat treated for high temperature service
ASTM A-523	G-62.5		Plain end seamless & ERW steel pipe for high pressure pipe type cable circuits
ASTM A-524	B-125.37	B-36.56	Seamless C.S. pipe for process piping
ASTM A-530	B-125.20	B-36.57	General requirements for specialized carbon and alloy steel pipe
API 5L			Line pipe
API 5LX			High test line pipe
API 5LS			Spiral weld line pipe

NACHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

FEDERAL

WWP-404c is similar to ASTM A-53 except that Government inspection and continuous identification marking of electric weld and seamless is mandatory. It covers black and galvanized welded and seamless pipe for flanging, bending, and coiling and for use with fresh water, oil, steam, air, and gas on shore plus a limited number of shipboard uses. Sizes 1/8 inch through 24 inch. WWP-406c is a federal specification comparable to ASTM A-120 (withdrawn 1988). Mills can certify that A-120 pipe in a distributor's stock meets all the requirements of WWP-406c.

A.W.W.A.

C-200 covers black welded and seamless pipe intended for the conveyance of water in sizes 6 inch and larger. Specification prescribes hydrostatic test pressures for sizes of pipe covered. Tensile, flattening, and bending tests are required.

ASME

B31.1 Code for pressure piping. Prescribes minimum requirements for design, manufacture, test, and installations of power piping systems for steam generating plants, central heating plants, and industrial plants.

B31.2 Fuel Gas Piping.

B31.3 Petroleum Refinery Piping.

B31.4 Liquid Petroleum Transportation Piping Systems.

B31.5 Refrigeration Piping.

B31.7 Nuclear Power Piping

B31.8 Gas Transmission and Distributing Piping Systems. Covers design, fabrication, installation, inspection, testing, and the safety aspects of operation and maintenance of gas transmission and distribution systems.

ANSI (ASME)

B36.10 American Standard for Wrought-Steel and Wrought-Iron pipe. Designates dimensions, weights, and schedule numbers for welded and seamless pipe. Schedules 10 through Schedules Double Extra Heavy (DXH/XXH).

B36.19 American Standard for Stainless Steel Pipe. Designates dimensions, weights, and schedule numbers for welded and seamless Stainless Steel Pipe, Schedules 5 through Schedules 80.

A.A.R.

M-111 covers black and galvanized welded and seamless pipe intended for coiling, bending, flanging, and other special purposes; and is suitable for welding. Purpose for which pipe is intended should be stated on orders. M-111 is comparable in most requirements to ASTM A-53.

M-130 covers black and galvanized welded and seamless pipe for ordinary uses in steam, water, gas, and air lines. Sizes 1/8 inch through 12 inch. Pipe to this specification is not intended for close coiling, bending, or high temperature service. M-130 is comparable in most requirements to ASTM A-120.