บทที่ 2 ทฤษฎี

สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะเป็นทฤษฎีเกี่ยวกับไฮโดรเจน กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เครื่องยนต์แก๊สโซลีน และทฤษฎีระบบการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งทฤษฎีของไฮโดรเจนประกอบไปด้วย สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ส่วนของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนจะประกอบไปด้วย การทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ระบบฉีดเชื้อเพลิงของฮอนด้า การฉีดเชื้อเพลิงด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ และการควบคุมการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงพื้นฐาน รวมทั้งการออกแบบการทดลองและการทดสอบสมมติฐาน

2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแก๊สไฮโดรเจน [14]

ไฮโดรเจนเป็นธาตุทางเคมีที่มีคุณสมบัติคือที่อุณหภูมิปกติจะไม่มีสีไม่มีกลิ่น และไม่เป็นพิษ ไฮโดรเจนในสถานะแก๊สมีความสามรถในการกระจายตัวได้สูงมาก สัมประสิทธิ์การกระจายตัวของไฮโดรเจนในอากาศมีประมาณ3 เท่าของสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของมีเทน, ออกซิเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนมีสัมประสิทธิ์มวลพลังงานสูงมากกว่าเชื้อเพลิงทางเคมีทั้งหมดและมวลพลังงานจะสิ้นเปลืองน้อยกว่าเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนประมาณ 3 เท่า มากกว่าแอลกอฮอล์ 5-6 เท่า และมากกว่าแอมโมเนียถึง 7 เท่าเป็นต้นซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของไฮโดรเจนเมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สโซลีนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

การที่จะแยกแก๊สไฮโดรเจนออกมาจากสารประกอบทั่วไปที่มีอยู่ในธรรมชาติสามารถทำได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น การใช้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสหรือ การทำรีฟอร์มมิ่ง เป็นต้น ในปัจจุบันแก๊สไฮโดรเจนได้จากวัตถุดิบสองแหล่งหลักคือ เชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวกแก๊สธรรมชาติ ถ่านน้ำมัน และเชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น ชีวมวล เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไฮโดรเจนและแก๊สโซลีน

Property	Hydrogen		Gasoline
	Gaseous	Liquid	
1) Molecule mass	2.016	2.016	107.0
2) Density, g cm^3 (20 °C,760 mm Hg)	83.764 x 10^{-6}	0.0708	0.70-0.75
3) Specific heat absorption g^{-1} K	14.89	9.69	2.20
4) Dynamic viscosity, g cm^{-1} s	0.0000875	0.00133	0.002
5) Heat conduction, mW cm^{16}K	1.987	1.00	1.31
6) Range of combustion in air in volume, %	4-75	-	1.0-7.6
7) Stoichiometric content in volume, %	29.63	-	1.0-7.6
8) Minimum ignition energy in air, mJ	0.02	-	0.24
9) Self-ignition temperature, K	858	-	501-744
10) Flame temperature in air, K	2318	-	2470
11) Amount of heat energy in percentage emitted by the flame in environment	17-25	-	30-43
12) Combustion speed in air at normal conditions, cm^{-1}s	265-325	-	37-43
13) Detonation rate in air at normal conditions, Km S^{-1}	1.48-2.15	-	1.4-1.7
14) Diffusion coefficient in air at normal conditions, $cm^2 s^{-1}$	0.61	-	0.05
15) Rate of diffusion in air at normal conditions, $cm^2 s^{-1}$	2.00	-	0.17
16) Rate of rise in air at normal condition, m s^{-1}	1.2-9	-	Unrising
17) Working mixture content-ratio of amount of air and fuel			
(a) ratio of air and fuel (in units of weight)	364.8-4.8	-	25-4.3
(b) ratio of air and fuel (in units of volume)	24-0.3	-	100-16.7
18) Theoretical content of the working mixture			
(a) ratio of air and fuel (in units of weight)	34.3	-	15.1
(b) ratio of air and fuel (in units of volume)	2.38	-	59.5

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไฮโดรเจนและแก๊สโซลีน (ต่อ)

Property	Hydrogen		Gasoline
	Gaseous	Liquid	
19) Low heat of combustion			
(a) In mass KJ kg^{-1}	120000	-	44000
(b) In volume KJ cm^{-2}	-	8496	32560
20) Heat emission from 1 ml stoichiometric mixture, KJ	3.185	-	3.914
(a) Combustion products, mg;			
H_2O	239.0	-	267.5
CO_2	-	-	267.5
(b) Change of the volume of exhaust gases	-15%	-	+5.5%
21) Comparison of the volume of hydrogen and its respective gasoline to obtain the same heat emission, liter			
(a) At 20 °C and 0.1 Mpa	3.240	3.83	1
(b) At 20 °C and 20 Mpa	16.2	-	1

2.2 เทคโนโลยีการผลิตแก๊สไฮโดรเจน [15]

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน แบ่งได้เป็น 3 เทคโนโลยีหลักคือ

2.2.1 อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis Process)

เป็นการใช้ไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน โดยแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดที่ขั้วแคโทด และแก๊สออกซิเจนจะเกิดที่ขั้วแอโนด สำหรับปัญหาด้านมลพิษนั้นหากกระแสไฟฟ้าที่นำมาใช้ในปฏิกิริยามาจากพลังงานแสงแดด หรือนิวเคลียร์นั้น ปัญหาด้านมลพิษก็จะหมดไป หรือน้อยลง

2.2.2 กระบวนการโฟโต้โวทาอิก (Photovoltaic Process)

เป็นการใช้พลังงานแสงเพื่อแยกน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนเช่น Photobiological Water Splitting, Photoelectrochemical Water Splitting

2.2.3 กระบวนการทางความร้อน (Thermal Process)

เป็นการใช้ความร้อนกับแหล่งพลังงาน เช่น แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน ชีวมวล เชื้อเพลิงเหลว เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน ซึ่งกระบวนการทางความร้อนที่นิยมใช้ เช่น Reforming Gasification Partial Oxidation, High-temperature Water Splitting

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบหลักการการแยกแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน

Primary Method	Process	Feedstock	Energy	Emissions
Thermal	Steam Reformation	Natural Gas	High Temperature Steam	Some Emissions. Carbon sequestration can mitigate their effect.
	Thermochemical Water Splitting	Water	High temperature heated from advanced gas-cooled nuclear reactors	No emissions
	Gasification	Coal, Biomass	Steam and oxygen at high temperature and pressure	Some Emissions. Carbon sequestration can mitigate their effect.
	Pyrolysis	Biomass	Moderately high temperature steam	Some Emissions. Carbon sequestration can mitigate their effect.

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบหลักการการแยกแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน (ต่อ)

Primary Method	Process	Feedstock	Energy	Emissions
Photovoltaic	Photobiological	Water and algae strains	Direct Sunlight	No emissions.
	Anaerobic Digestion Fermentative Microorganism	Biomass	High Temperature	Some Emissions.
Electrochemical	Electrolysis	Water	Electricity from wind, solar, hydro and nuclear	No emissions.
			Electricity from coal or natural gas.	Some Emission from electricity production.
	Photoelectrochemical		Direct Sunlight	No emissions.

ปัจจุบันการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์จะผลิตจากแก๊สธรรมชาติโดยวิธี Steam Reforming เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายถูกที่สุดโดยสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงถึงหลักการและข้อได้เปรียบ เสียเปรียบในแต่ละกระบวนการ

จากข้อมูลเบื้องต้น ในการศึกษาจะใช้วิธีการ อิเล็กโทรไลซิส เนื่องจากกระบวนการทางความร้อนต้องใช้ความร้อนในกระบวนการแยกแก๊สสูงมาก ซึ่งถ้านำมาใช้ในการทดลองอาจทำให้เกิดอันตรายได้ และในส่วนของ โฟโต้โวทาอิกเป็นการใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการของ อิเล็กโทรไลซิสเนื่องจากมีความเหมาะสมในแง่ของความปลอดภัย ง่ายต่อการควบคุมและการประยุกต์ใช้

2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลเซอร์ (Reaction Mechanism of Electrolyzer) [16]

เมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาในสารละลายเช่น น้ำ โดยการให้กระแสไฟฟ้านั้นผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ในสารละลาย จะทำให้เกิดการแยกตัวด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาคือ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สออกซิเจน ดังสมการที่ (2.1) (2.2) และ (2.3)

Anode : $H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$ (2.1)

Cathode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ (2.2)

Net Reaction : $H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2$ (2.3)

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีประจุบวก (H^+) และประจุลบ (OH^-) เคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดและขั้วแอโนดตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนขึ้นและยังทำให้เกิดการฟอร์มตัวของฟองแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งต้องประกอบไปด้วยส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา อันได้แก่ กระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลาย ค่าความต้านทาน ความดันอากาศ วัสดุของอิเล็กโทรด เป็นต้น โดยสามารถอธิบายปัจจัยเหล่านี้ผ่านความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ จลศาสตร์เคมี ไฟฟ้าเคมี และกฎพื้นทางทางไฟฟ้าเป็นต้น

2.3.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสคือ กระแสไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์หรืออาจกล่าวได้ว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดมีผลให้เกิดมีการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น ดังนั้นการที่จะเกิดการไหลของกระแสได้ต้องมีศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยความต่างศักย์ของการเกิดปฏิกิริยานี้ประกอบไปด้วยศักย์ไฟฟ้า 4 ชนิดคือ

1. Reversible Voltage (E_{rev}) หรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าผันกลับ เป็นศักย์ไฟฟ้าอย่างน้อยที่ต้องให้แก่ระบบสำหรับการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถพิจารณาได้จากค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์

2. Ohmic Drop (IR Drop) (E_{ohm}) เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานภายในของระบบ เช่น ความต้านทานของขั้วอิเล็กโทรด ความต้านทานภายในเมมเบรน หรือความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างจุดเชื่อมต่อที่มีการไหลของกระแสเป็นต้น

3. Polarization Voltage (E_{pol}) เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มข้นของสารละลายซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาถึงการถ่ายเทมวลในสารละลายนั้นๆ

4. Activation Voltage (E_{act}) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและสารละลายอิเล็กโทรไลซึ่งพิจารณาความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ที่ไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรด และสารละลายอิเล็กโทรไลท์

ซึ่งศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลท์ (E_{op}) มีค่าดังสมการ (2.4)

$$E_{op}=E_{rev}+E_{ohm}+E_{pol}+E_{act} \tag{2.4}$$

2.3.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์

เป็นของเหลวที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าทั้งจากตัวเองหรือการปรับปรุงด้วยการเติมสารที่มีความสามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าได้ดี เช่น การเติมเกลือ (NaCl) หรือ โซดาไฟ (โซเดียมไฮดรอกไซด์: NaOH) การเลือกสารประกอบที่สามารถแตกตัวได้นั้นพิจารณาจากความสามารถในการนำไฟฟ้าของไอออน การไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือไม่สูญสลายเมื่อได้รับพลังงานเข้ามาตลอดจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH ได้ง่าย ในการประยุกต์ใช้งานเราสามารถใช้สารละลายจำพวกกรดแก่ เบสแก่ หรือ เกลือ เช่นกรดซัลโฟริก โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และเกลือของสารประกอบต่างๆ ซึ่งการนำสารละลายจำพวกกรดไปใช้จะเกิดปัญหาการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลเซอร์ ทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้ ดังนั้นในเชิงพานิชย์สารละลายที่เป็นที่นิยมจะได้แก่สารละลายจำพวกเบส โดยใช้สารละลายโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก [13] การใช้งานเราจะมีหน่วยของการวัดความเข้มข้นเป็น โมลต่อลูกบาศก์เมตร (mol/m^3) ซึ่งค่าความเข้มข้นของไอออนสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$u=\frac{1}{2}\sum_i Z_i^2 c_i \tag{2.5}$$

เมื่อ Z คือ ค่าประจุของไอออน

c คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลาย (mol/L)

การวัดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ($Activities_i$) เราจะทำการพิจารณาค่า Activities ของสารในแต่ละสภาวะดังแสดงในตารางที่ 2.3 สารละลายที่มีความสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้นั้นแม้จะมี

ความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีแต่หากนำไปใช้กับขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่เหมาะสมจะเกิดการกัดกร่อนของวัสดุขึ้นได้

2.3.3 อิเล็กโทรด

เป็นวัสดุที่ต้องนำไฟฟ้าได้ดี โดยที่ผิวสัมผัสของวัสดุเป็นตัวเร่งให้เกิดการคายประจุของไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน อีกทั้งหน้าสัมผัสระหว่างสารละลายและผิวขั้วควรมีขนาดพอในการทำให้เกิดปฏิกิริยา รูปแบบของอิเล็กโทรดมีหลากหลายลักษณะซึ่งจะขึ้นกับการออกแบบเซลล์ เช่น ต้องการพื้นที่ผิวที่มาก เป็นแผ่นเรียบ หรือต้องการความละเอียดที่ผิววัสดุที่แตกต่างกัน ในกรณีของเซลล์ Alkaline นิกเกิลถูกใช้ในการทำขั้วอิเล็กโทรดเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีแต่ราคาแพง

การจำแนกชนิดของตัวนำไฟฟ้าโลหะส่วนใหญ่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีนั้นคือยอมให้มีการไหลผ่านของประจุอิเล็กตรอน แต่ก็มีวัสดุบางประเภทเช่น แก้ว ยาง หรือ เซรามิก ไม่ยินยอมให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่านไป ซึ่งเราเรียกวัสดุต่างๆเหล่านี้ว่าตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้าตามลำดับ สำหรับการพิจารณาสภาพการนำไฟฟ้าเราพิจารณาจากค่า Electrical conductivity (k) เมื่อ $\frac{1}{k}$ คือค่าความต้านทาน ดังตัวอย่างค่า k ของวัสดุต่างๆที่อุณหภูมิ 298 K ที่แสดงดังตารางที่ 2.4 [15]

2.3.4 ตัวแบ่งแยก (Separator)

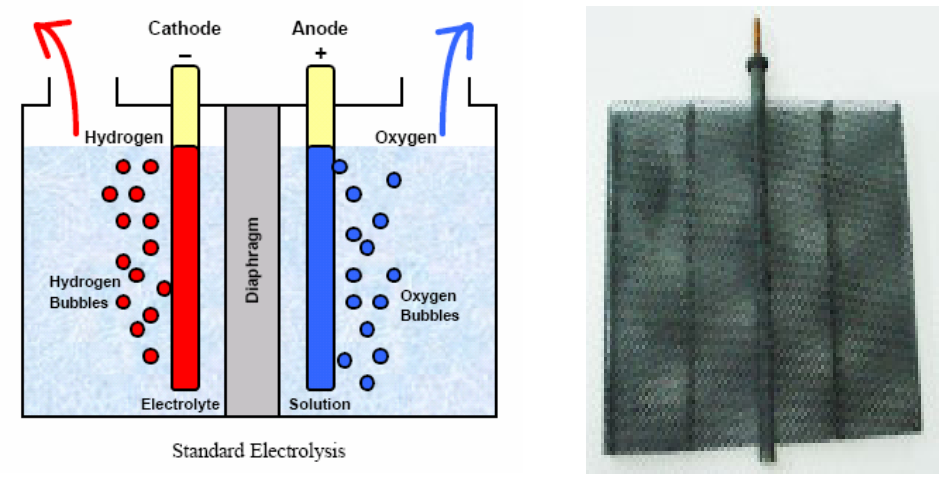
เป็นอุปกรณ์ที่การสัมผัสกันโดยตรงของขั้วอิเล็กโทรด อีกทั้งยังป้องกันการผสมกันของสารที่ผ่านการแยกแล้วดังรูปที่ 2.1 a.โดยเครื่องแบ่งแยกจะประกอบไปด้วย Diaphragm ที่ยอมให้ไอออนไหลผ่านได้แต่ไม่ยอมให้สารไหลผ่าน ซึ่งตัวแบ่งแยกนี้มีลักษณะเป็นแผ่นบางดังแสดงดังรูปที่ 2.1 b. ข้อควรระวังของตัวแบ่งแยกสารคือการที่ไอออนของสารสามารถเดินทางผ่านไปมาระหว่างกันได้ทำให้มีโอกาศเกิดการผสมกันของสารขึ้นเช่นการใช้ Nafion-117 ที่ความดัน 30 บาร์ จะมีสารอื่นผสมอยู่ในไฮโดรเจน 2 % โดยปริมาตร

2.3.5 ถังบรรจุ

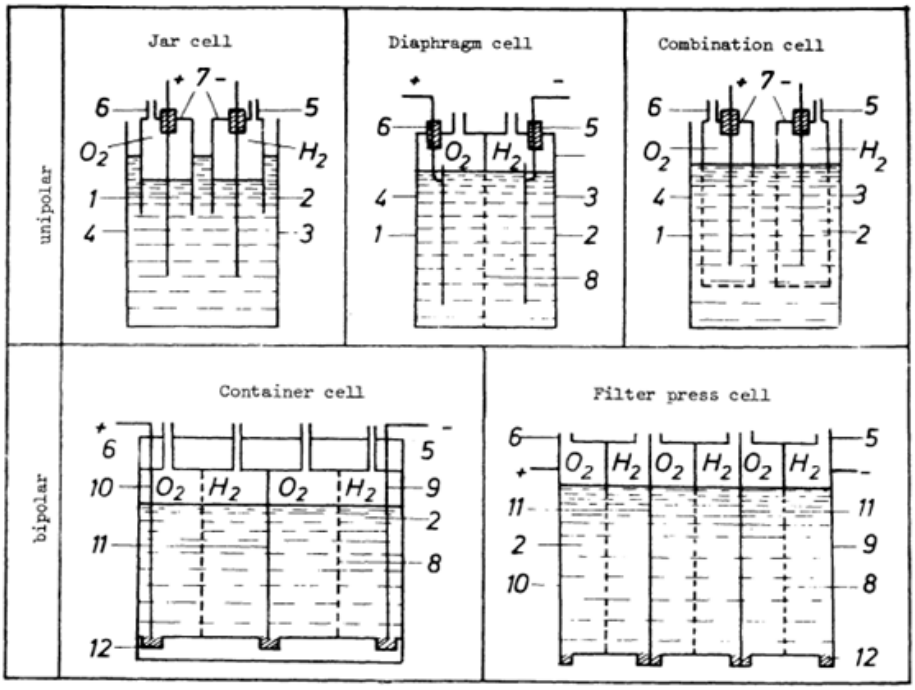
ใช้สำหรับบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลท์ ซึ่งทำมาจากเหล็กนิกเกิล หรือวัสดุอื่นที่สามารถกักเก็บสารได้ซึ่งลักษณะของถังบรรจุแสดงดังรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.3 การวัดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

Species i	Activity replacement
Pure solid	$a_i = 1$
Pure liquid	$a_i = 1$
Pure gas or component of a gas mixture	$a_i \approx \rho_i/\rho^\circ$, ($\rho^\circ = 10^5$ Pa)
Solvent	$a_i \approx 1$
Nonionic solute at low or moderate concentration	$a_i \approx c_i/c^\circ$ e($c^\circ = 10^5$ mol m^{-3})
Nonionic solute at moderate or high concentration	$a_i = \gamma_i c_i/c^\circ$ (γ_i = must be measured)
Ionic solute in a solution of extremely low ionic strength	$a_i \approx c_i/c^\circ$
Ionic solute in aqueous solution of low or moderate or high concentration	$a_i \approx \frac{c_i}{c^\circ} exp\{-z_i^2 \sqrt{\frac{\mu}{727 \text{ mol } m-3}}\}$
Ionic solute in a solution of extremely high ionic strength	$a_i = \gamma_i c_i/c^\circ$ (γ_I is a part of $\gamma \pm$, which must be measured)
Langmuirian adsorbate	$a_i = \Gamma/(\Gamma_i^{max} - \Gamma_i)$



รูปที่ 2.1 a.) ลักษณะของตัวแบ่งแยก **b.)** ลักษณะของแผ่น diaphragm



รูปที่ 2.2 ลักษณะของถังบรรจุในการนำไปใช้งาน

2.4 ประเภทของอิเล็กโทรไลเซอร์

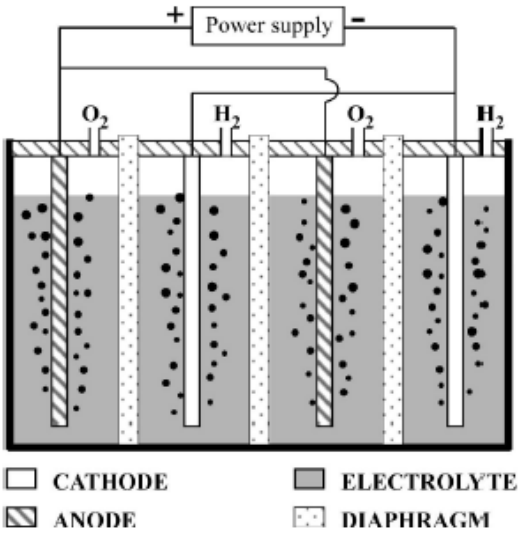
ชนิดของอิเล็กโทรไลเซอร์ที่นิยมใช้กันอย่างทั่วไปสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทคือ อิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์ (Alkaline) อิเล็กโทรไลเซอร์แบบสารโพลิเมอร์ของแข็ง (Solid polymer) และอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide)

2.4.1 อิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์

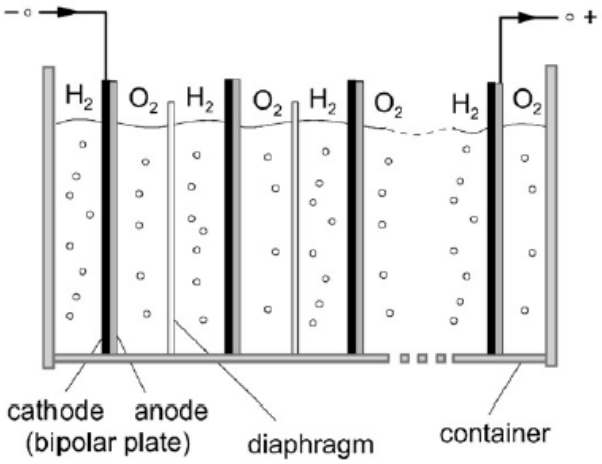
เป็นชื่อที่รู้จักกันดีของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบที่ใช้สารละลายที่มีค่า pH สูง เช่นการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ อิเล็กโทรไลเซอร์ ชนิดนี้ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักคือ ถังบรรจุ สารละลาย ขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และตัวกั้นสาร ดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 สำหรับปัญหาของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์คือหากสารละลายที่ใช้เป็นกรด หรือเกลือแล้วจะเกิดการกัดกร่อนของตัวอิเล็กโทรไลเซอร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 2.4 สมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity of various materials most at 298K) [15]

Material	k/S m^{-1}	Charge carriers
Superconductors(low temp.)	∞	electron pairs
Ag	6.3×10^{7}	electrons
Cu	6.0×10^{7}	electrons
Hg	1.0×10^{6}	electrons
C(graphite)	4×10^{4}	pi electrons
Doped polyrrole	6×10^{3}	pi electrons
Molten KCl (at 1043 K)	217	K^{+} and Cl^{-}
5.2 M H_2SO_4 (battery acid)	8.2	H^{+} and HSO_4^{-}
Seawater	5.2	cations and anions
Ge	2.2	electrons and holes
0.10 M KCl	1.3	K^{+} and Cl^{-}
H_2O	5.7×10^{-6}	K^{+} and OH^{-}
Typical glass	3×10^{-10}	univalent cations



รูปที่ 2.3 ลักษณะของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์ชนิดโมโนโพลา

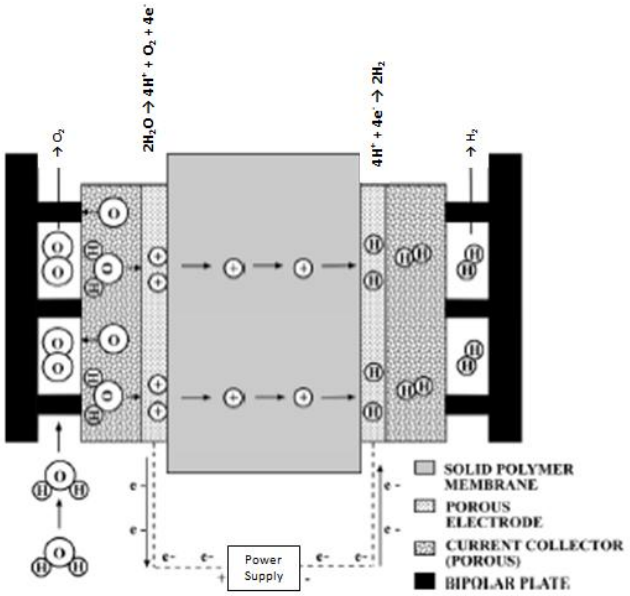


รูปที่ 2.4 ลักษณะการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์ชนิดไบโพลา

2.4.2 อิเล็กโทรไลเซอร์แบบสารโพลิเมอร์ของแข็ง

เป็นอิเล็กโทรไลเซอร์แบบหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane โดยอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดนี้ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในกิจการของ นาซ่า (NASA) ซึ่งการทำงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดนี้คือสามารถทำงานได้ที่ความต่างศักย์ต่ำ (1.4 ถึง 2 โวลท์) ความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่สูงถึง (2 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) หรือแม้ที่ๆมีอุณหภูมิ (80-150 องศาเซลเซียส) และความดันที่สูง (135 บาร์) อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดนี้ยังให้ประสิทธิภาพที่ดีคือประมาณ 80-90 % และยังให้แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการผลิตมีความบริสุทธิ์ถึง 99.999% ลักษณะของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบสารโพลิเมอร์ของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีลักษณะของตัวอุปกรณ์คล้าย

กับของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์ชนิดไบโพลาดังรูปที่ 2.4 ซึ่งของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบสารโพลิเมอร์ของแข็งนี้ใช้เมมเบรนเป็น Nafion (ซึ่งเป็นวัสดุจำพวก Perfluorosulfonic acid) การใช้งานคือจ่ายน้ำบริสุทธิ์ให้ไหลเข้ามาในระบบเพื่อใช้ผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สอ๊อกซิเจน ความหนาของเมมเบรนชนิดนี้อู่ที่ประมาณ 150 – 300 ไมโครเมตร แต่อย่างไรก็ตามราคาของของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบสารโพลิเมอร์ของแข็งมีราคาที่แพงอันเนื่องมาจากส่วนของวัสดุที่ใช้ (แพลตินัม) และเมมเบรนโพลิเมอร์อีกทั้งยังต้องการน้ำที่บริสุทธิ์

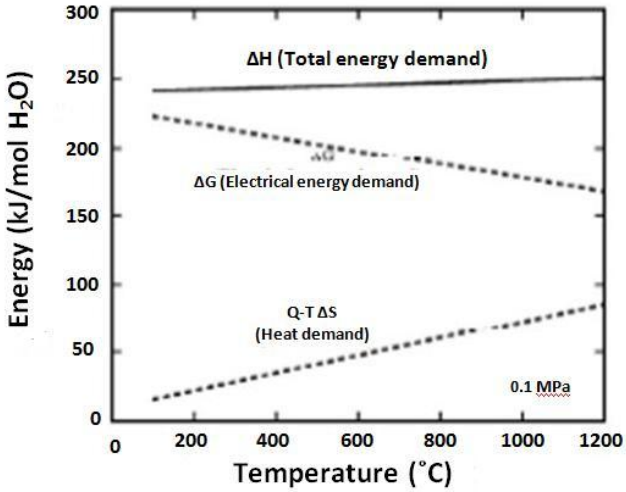


รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของอิเล็กโทรไลเซอร์แบบสารโพลิเมอร์ของแข็ง

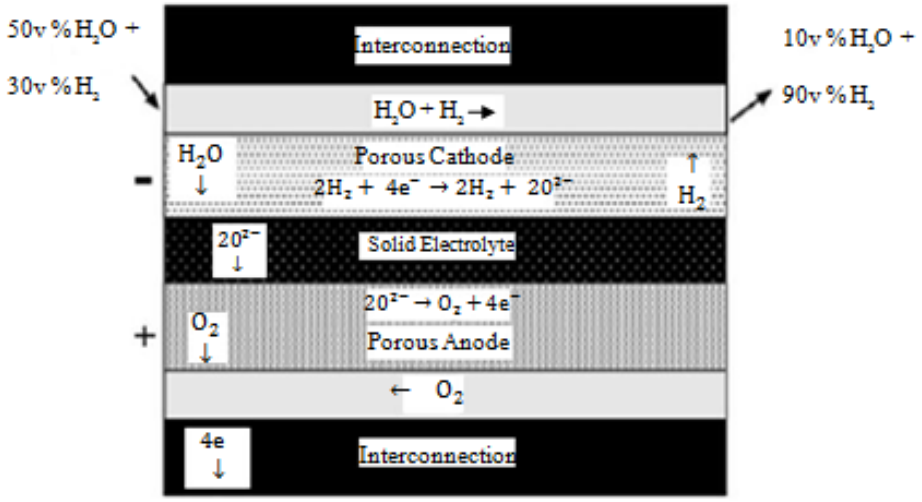
2.4.3 อิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์ของแข็ง

ได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อคริศต์ศักราช 1970 สำหรับการใช้งานนั้นมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่สูงคือประมาณ 1000 องศาเซลเซียส และเนื่องจากอุณหภูมิใช้งานที่สูงนี้เองทำให้น้ำที่นำเข้ามาในระบบจะมีสภาวะเป็นไอน้ำทำให้ใช้พลังงานในการแตกตัวนั้นน้อยกว่ากล่าวคือ หากนำน้ำมาทำการแตกตัวต้องมีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเท่ากับ 285.83 kJ/mol แต่หากนำไอน้ำเข้ามาในระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเท่ากับ 241.8 kJ/mol ซึ่งจะทำให้ค่า E_{rev} มีค่าน้อยลง โดยแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้เทียบกับอุณหภูมิของน้ำดังรูปที่ 2.6 สิ่งสำคัญประการหนึ่งคือปัญหาเรื่องอายุการใช้งาน และการนำไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิสูงต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าซึ่งวัสดุที่ใช้ในอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์แข็งตัวอย่างเช่น yttria stabilized zirconia ข้อดีของอิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดนี้คือการใช้พลังงานที่น้อยมากเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์

(ประมาณ 10% ของแบบอัลคาไลน์)ลักษณะโครงสร้างของในอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์ของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 กราฟพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบ



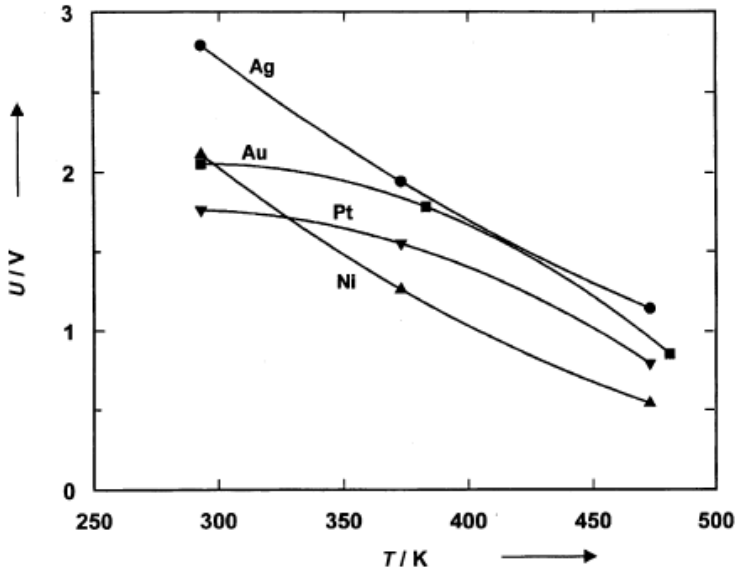
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของในอิเล็กโทรไลเซอร์แบบออกไซด์ของแข็ง

2.5 ผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลเซอร์

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงส่วนประกอบที่สำคัญตลอดจนเงื่อนไขและสมการต่างๆที่ส่งผลต่อการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลท์ซิส ซึ่งทำให้เราทราบว่ายังมีผลของปัจจัยอื่นๆที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยาอยู่ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงปัจจัยที่ส่งผลดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.5.1 วัสดุอิเล็กโทรดเมมเบรน

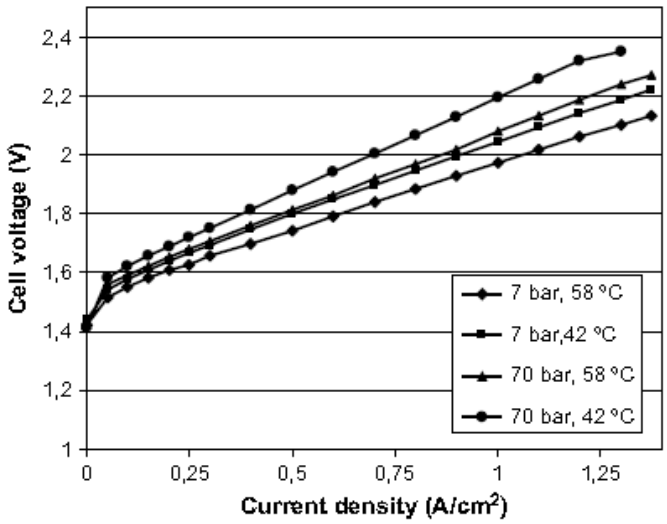
เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับสร้างอิเล็กโทรดและเมมเบรนเป็นวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีนั้นคือสามารถทำหน้าที่ในการส่งผ่านประจุอิเล็กตรอนให้แก่ปฏิกิริยาอีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของการเกิดอีกหน้าที่หนึ่ง ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่แสดงถึงอุณหภูมิต่างๆมีผลต่อค่าความต่างศักย์ของวัสดุ



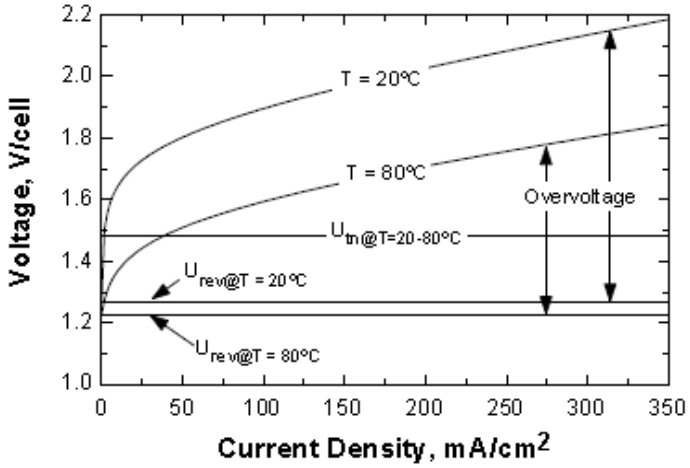
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิกับความต่างศักย์ไฟฟ้าวัสดุแต่ละชนิด

2.5.2 ความดันและอุณหภูมิ

จากสมการและความสัมพันธ์ต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น เราทราบดีว่าอุณหภูมิและความดันเป็นตัวแปรที่อยู่ในสมการหรือมีความสัมพันธ์กันอยู่ ตัวอย่างเช่น การคำนวนค่า E_{rev} เราทำการคำนวนผ่านค่าเอนทาลปี หรือค่า Gibb's free energy ซึ่งจะมีความดันและอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบดังแสดงดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10



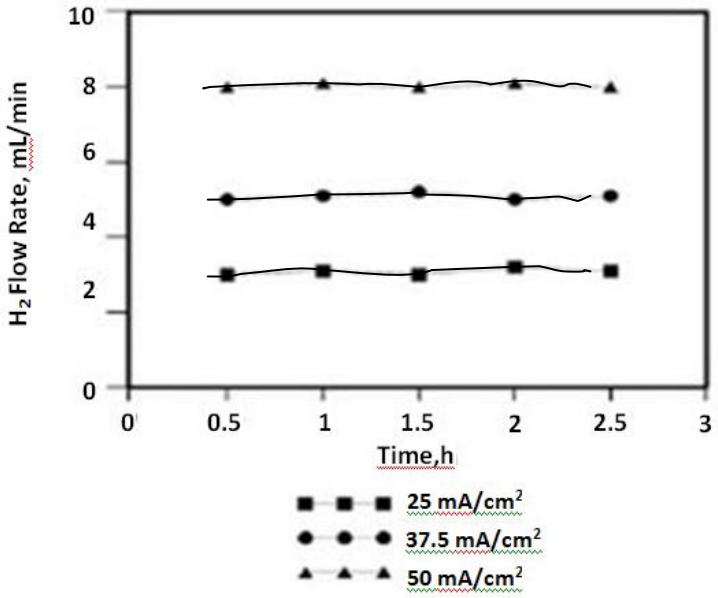
รูปที่ 2.9 ความแตกต่างของความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิ



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ที่อุณหภูมิสูงและต่ำ

2.5.3 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่

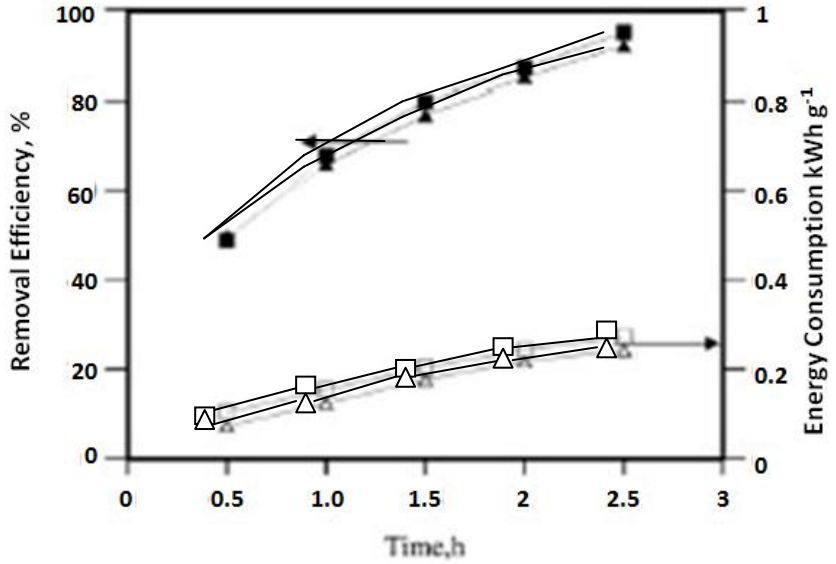
จากกฎของฟาราเดย์ว่ากระแสไฟฟ้าส่งผลถึงการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลท์ซิส ซึ่งหากมีการให้กระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณมากอัตราการเกิดของผลิตภัณฑ์จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยได้ ดังแสดงดังรูปที่ 2.11 การเกิดแก๊สไฮโดรเจนโดยการผ่านกระแสไปในอิเล็กโทรไลเซอร์แบบโพลิเมอร์แข็งที่แสดงถึงปริมาณของกระแสกับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.11 ค่าอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงกระแส

2.5.4 ความเป็นกรดเบสของสารละลาย

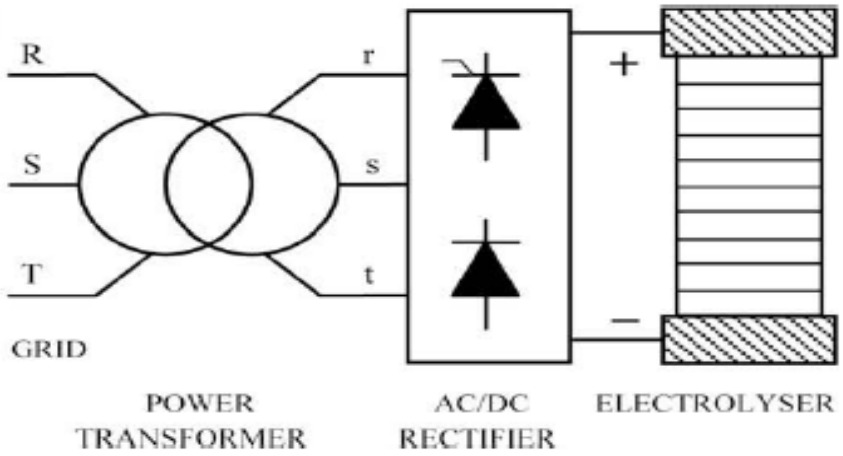
สามารถนำมาอธิบายถึงความสามารถในการแตกตัวของสารละลายได้ซึ่งนั้นก็คือค่าความเข้มข้นของสารละลาย ดังนั้นเราสามารถที่จะใช้สมการของเนิสต์ในการหาความต่างศักย์ได้ด้วยความสัมพันธ์ของค่า pH ดังรูปที่ 2.12



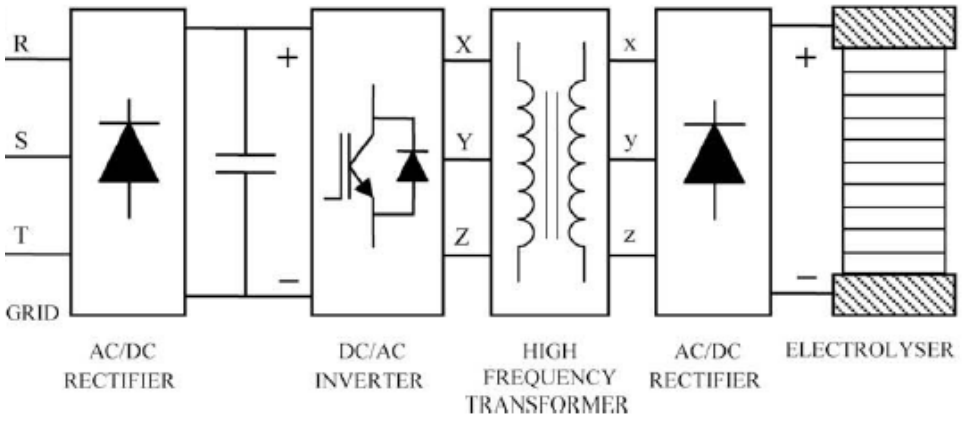
รูปที่ 2.12 ผลของค่า pH ที่มีต่อการใช้พลังงานและสัมประสิทธิ์การเคลื่อนของไอออน

2.5.5 ชนิดของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

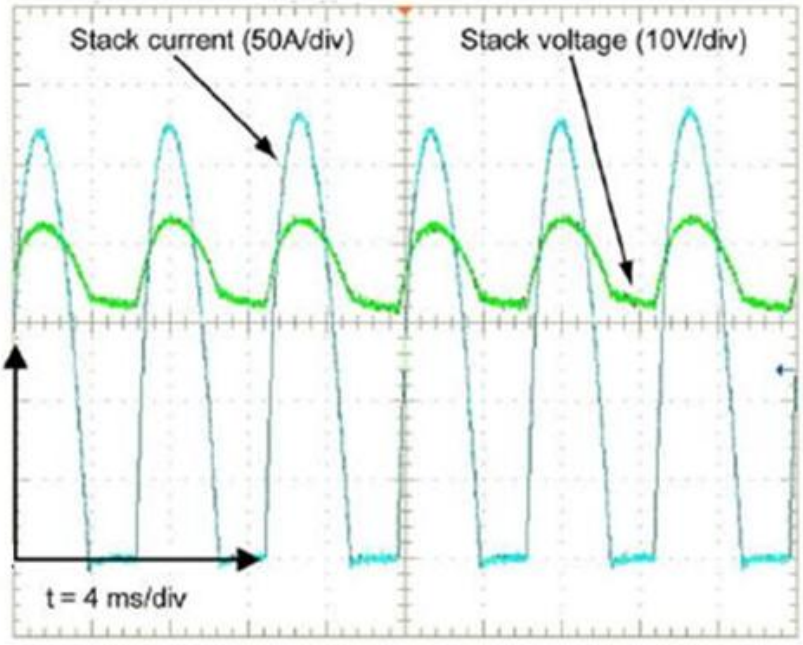
การใช้งานอิเล็กโทรไลเซอร์จำเป็นต้องมีการใช้กระแสไฟฟ้าในการจ่ายอิเล็กตรอนเพื่อให้กระบวนการสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 แสดงแหล่งจ่ายไฟแบบ three-phase half controlled rectifier และthree-phase full-bridge rectifier ตามลำดับ ซึ่งผลของกระแสไฟฟ้าที่ออกมาจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคงที่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบอีกทั้งยังส่งผลถึงการใช้พลังงานและการสูญเสียพลังงานดังรูปที่ 2.17



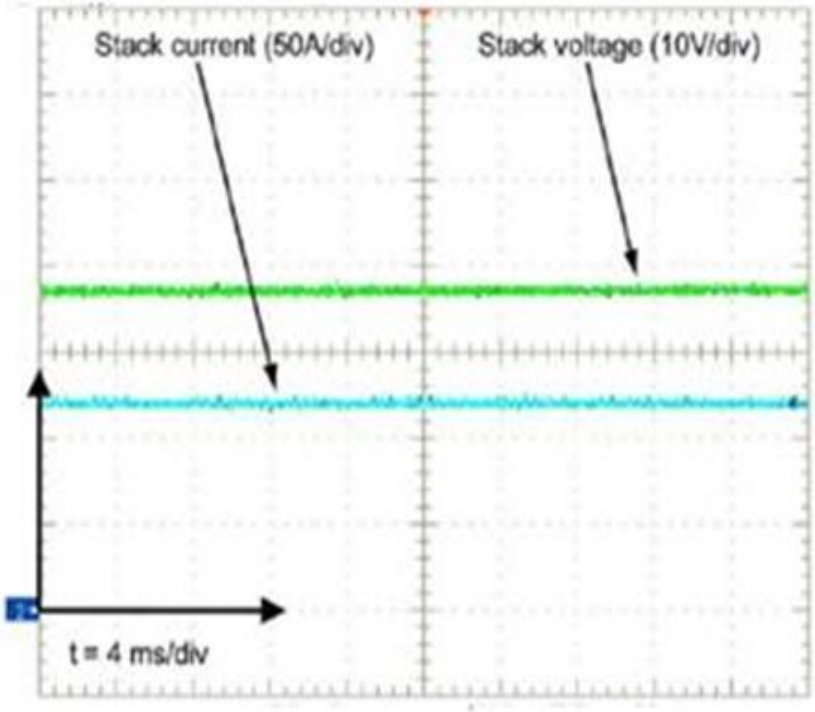
รูปที่ 2.13 วงจรของ three-phase half controlled rectifier (ThPS) [16]



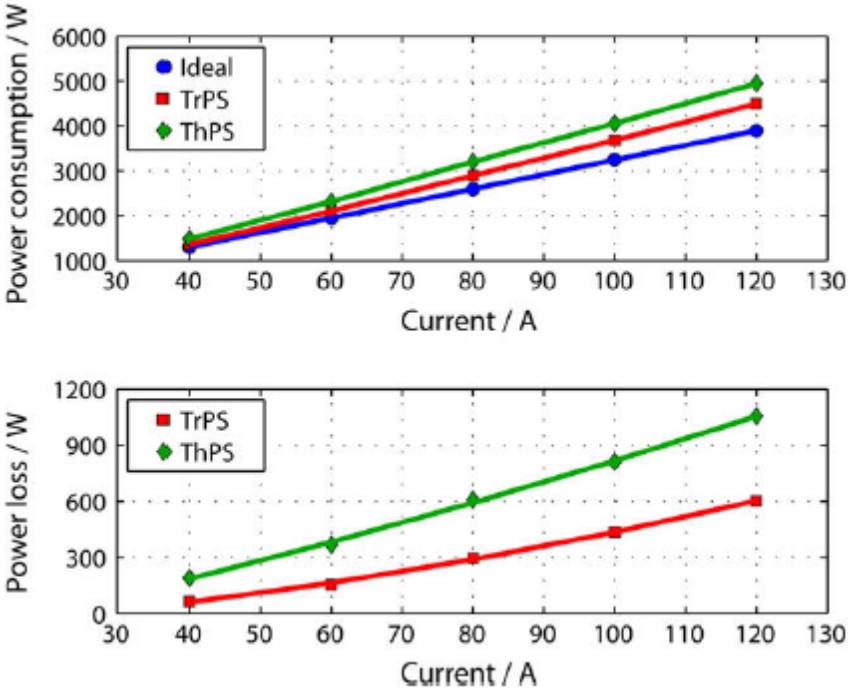
รูปที่ 2.14 วงจรของthree-phase full-bridge rectifier (TrPS) [16]



รูปที่ 2.15 ลักษณะกระแสและแรงดันที่ได้จากวงจร ThPS [16]



รูปที่ 2.16 ลักษณะกระแสและแรงดันที่ได้จากวงจร TrPS [16]



รูปที่ 2.17 การใช้พลังงานและพลังงานที่สูญเสียไปของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า [16]

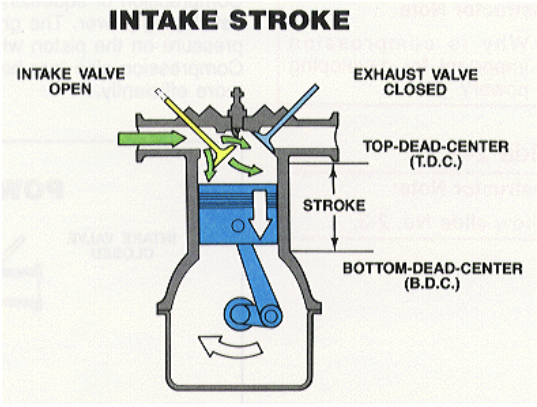
จากการศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาในอิเล็กโทรไลเซอร์ พบว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยานั้นจำเป็นต้องมีส่วนประกอบต่างๆด้วยกัน คือแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า สารละลาย ขั้วอิเล็กโทรด เมมเบรน ตัวแยกสาร ถังบรรจุ ตลอดจนปัจจัยอันได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย อัตราการไหลของสารละลาย ระบบหล่อเย็นอุปกรณ์

2.6 การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนเบื้องต้น [17]

เครื่องยนต์แก๊สโซลีน เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งทำงานแบ่งเป็น 4 จังหวะ หรือ 4 ขั้นตอน คือ จังหวะดูด จังหวะอัด จังหวะระเบิด จังหวะคาย การที่เครื่องยนต์ทำงานครบ 4 จังหวะ ในขณะเดียวกันเพลาข้อเหวี่ยงจะหมุน 2 รอบ ซึ่งเรียกว่า " Four stroke cycle engine"

2.6.1 จังหวะดูด (Intake Stroke)

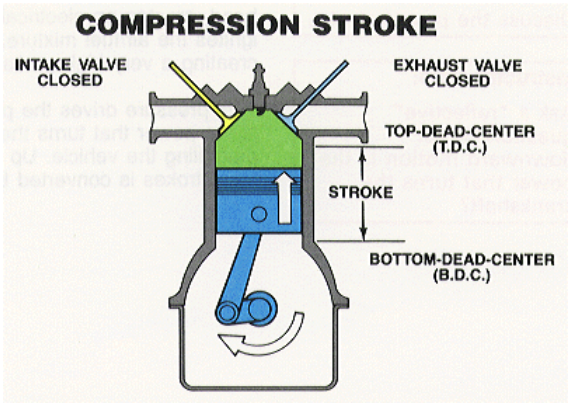
เริ่มต้นจากลูกสูบอยู่ด้านบนเคลื่อนที่ลงมาสู่ด้านล่างเพื่อ ดูดส่วนผสมไอดี (น้ำมันและอากาศ) เข้ามาในกระบอกสูบโดยดูดผ่านทางวาล์วไอดี ซึ่งวาล์วไอดีจะปิดเมื่อสิ้นสุดจังหวะดูดโดยที่การเคลื่อนที่ของลูกสูบ จะขึ้นอยู่กับเพลาข้อเหวี่ยง (Crank shaft) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 จังหวะดูด

2.6.2 จังหวะอัด (Compression Stroke)

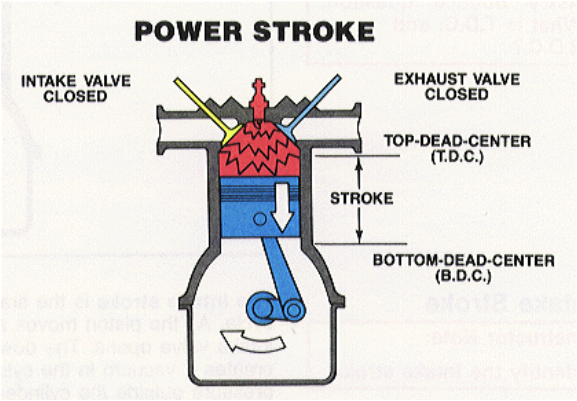
เป็นจังหวะที่เมื่อวาล์วไอดีปิดเรียบร้อยแล้ว ลูกสูบก็จะเคลื่อนที่จากล่างขึ้นบนเพื่ออัดส่วนผสมไอดีที่ถูกดูดเข้ามา ทั้งหมด ถูกอัดตัวทำให้แรงดันในกระบอกสูบสูงขึ้น สมมุติ อัตราส่วน กำลังอัด 10 ต่อ 1 ก็หมายความว่า ลูกสูบลูกหนึ่งสามารถดูดอากาศเข้าไปได้ 10 ลิตรลูกสูบก็จะต้องอัดอากาศ 10 ลิตรให้เหลือเพียง 1 ลิตร ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 จังหวะอัด

2.6.3 จังหวะระเบิด (Power Stroke)

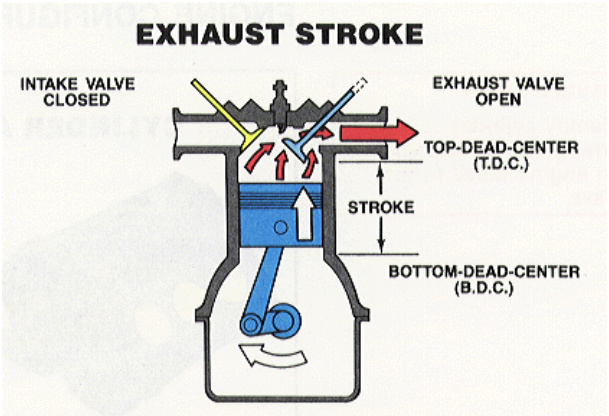
จังหวะนี้จะต่อเนื่องกับจังหวะที่แล้วคือ ในตำแหน่งที่ลูกสูบขึ้นไปสูงสุดนั้นจะมีการเผาไหม้เกิดขึ้น ซึ่งหัวเทียนเป็นตัวทำให้เกิดประกายไฟเพื่อไปจุดส่วนผสมระหว่างน้ำมัน กับอากาศให้เกิดการเผาไหม้ และในจังหวะระเบิดนี้เองที่ส่งกำลังออกมาให้ใช้งานกันและลูกสูบก็จะ เคลื่อนที่ลงมาสู่ด้านล่าง และวาล์วไอเสียก็จะเริ่มเปิดดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 จังหวะระเบิด

2.6.4 จังหวะคาย (Exhaust Stroke)

เป็นการทำงานต่อจากจังหวะระเบิด เมื่อลูกสูบได้รับแรงกระแทกมาจากการเผาไหม้ ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลงมา สู่ด้านล่าง พร้อมกับเปิดวาล์วไอเสีย แล้วลูกสูบก็จะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนพร้อมกับจัดการกวาดเอาไอเสียออกไปและ เมื่อลูกสูบขึ้นไปจนสุด วาล์วไอเสียก็จะปิด วาล์วไอดีก็จะเริ่มเปิดเพื่อเข้าสู่การดูดอีกครั้ง และจะวนอยู่แบบนี้ไปเรื่อยๆ รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 จังหวะคาย

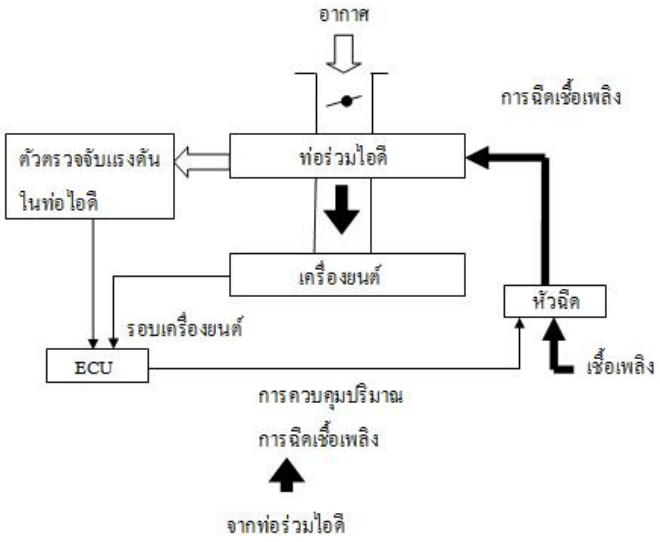
2.7 ระบบฉีดเชื้อเพลิงของรถจักรยานยนต์ฮอนด้า Click-i_ รุ่น ANC 110 [18]

เครื่องยนต์ Honda Click-I เป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 1 สูบ 4 จังหวะ ขนาดความจุกระบอกสูบ 110 CC. ฉีดเชื้อเพลิงด้วยระบบหัวฉีด PGM-FI คือระบบจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง แบบหัวฉีด ที่ควบคุมการทำงานโดยคอมพิวเตอร์หรือสมองกล ECM (Engine Control Module) ซึ่งจะทำให้การจ่ายน้ำมันมี

ความเที่ยงตรงและแม่นยำ ในแต่ละสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งได้ถูกพัฒนามาจากระบบการจ่ายเชื่อเพลิง เดิมจะเป็นการจ่ายเชื้อเพลิงโดยใช้คาร์บูเรเตอร์ในการผสมอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิง

2.7.1 ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง แบบ D-EFI หรือ Manifold pressure control type

เป็นระบบที่มีการควบคุมระยะเวลาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของหัวฉีดโดยวิธีการวัดแรงดันของอากาศในท่อไอดี ด้วยตัวจับความดันในท่อไอดี แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งเข้ากล่อง ECM เพื่อกำหนดระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของหัวฉีดให้เหมาะสมกับปริมาณอากาศที่เข้ากระบอกสูบ หลักการทำงานของระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบ D-EFI สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การตรวจจับแรงดันในท่อร่วมไอดี

2.8 หลักการทำงานของการฉีดน้ำมัน

อัตราส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงที่เผาไหม้สมบูรณ์โดยทางทฤษฎีจะเป็น 12.6:1 โดยน้ำหนัก นั่นคืออากาศหนัก 12.6 กรัมจะต้องใช้เชื้อเพลิง 1 กรัมเป็นส่วนผสม ข้อแตกต่างของอัตราส่วนผสม 14.7:1 และ 12.6:1 แสดงว่าส่วนผสมของ12.6:1จะหนา แต่ถ้าอัตราส่วนผสม 14.7 : 1 ก็แสดงว่าส่วนผสมบาง หน่วยหลักที่จะควบคุมให้อัตราส่วนของอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงได้สัดส่วนพอดีทางทฤษฎีคือปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่กระบอกสูบซึ่งวัดโดยความดันในท่อไอดี (สำหรับระบบ EFI-D) และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ซึ่งส่งสัญญาณมาจากคอยล์จุดระเบิดขณะที่เครื่องยนต์มีความเร็วรอบต่ำ ลิ้นเร่งจะเปิดให้อากาศไหลเข้ากระบอกสูบน้อยเป็นผลให้ความดันในท่อไอดีต่ำ ตัวตรวจจับความดันในท่อไอดี จะส่งสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับความดันอากาศในท่อไอดีในขณะนั้น เข้าไปที่กล่อง ECM ในสภาวะแบบนี้กล่อง ECM จะสั่งจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงน้อยและในทางกลับกันหากบิด

คันเร่งมากขึ้นจะท้าให้มีอากาศไหลเข้ากระบอกสูบมากขึ้น เป็นผลให้ความดันในท่อไอดีสูงขึ้นในสภาวะแบบนี้กล่อง ECM จะสั่งจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น

การควบคุมระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ระบบจะมีการควบคุมระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การควบคุมระยะเวลาการฉีดพื้นฐาน และการเพิ่มระยะเวลาในการฉีดตามสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ โดยมีรายละเอียดการควบคุมดังนี้

1. การควบคุมระยะเวลาในการฉีดพื้นฐาน กล่อง ECM จะได้รับสัญญาณไฟฟ้าจากตัวตรวจจับความดันในท่อไอดีและสัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์ สัญญาณไฟฟ้าทั้งสองจะเป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับ กำหนดระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของหัวฉีด ระยะเวลาในการฉีดที่ได้จากสัญญาณทั้งสองนี้จะเรียกว่า ระยะเวลาในการฉีดพื้นฐาน

2. การเพิ่มระยะเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากเครื่องยนต์ต้องทำงานภายใต้สภาวะต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาจึงท้าให้อัตราส่วนผสมที่ได้จากสัญญาณการฉีดพื้นฐานไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของเครื่องยนต์ในทุกสภาวะการท้างานได้ ดังนั้นจึงต้องมีตัวตรวจจับสภาวะการท้างานของเครื่องยนต์ (Sensor) เป็นตัวส่งข้อมูลสภาวะการท้างานต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ให้กล่อง ECM ทราบเพื่อที่กล่อง ECM จะได้น้าข้อมูลเหล่านั้นไปประมวลผลคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่เครื่องยนต์ต้องการในสภาวะนั้น ๆ แล้วสั่งให้หัวฉีดฉีดน้ำมันออกมาผสมกับอากาศให้ได้ส่วนผสมที่พอเหมาะที่สุด

2.9 การควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ (EFI)

ระบบ PGM-FI เป็นระบบที่จัดให้มีการฉีดเชื้อเพลิงได้อย่างสูงสุดตามอุณหภูมิของไอดี ความเร็วรอบเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ตำแหน่งของลิ้นเร่ง การจับตัวของออกซิเจนภายในท่อไอเสีย และสภาวะที่จำเป็นต่างๆ คอมพิวเตอร์ของระบบ PGM-FI จะควบคุมปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกส่งเข้าสู่เครื่องยนต์ที่จังหวะการฉีด ตามอัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงสูงสุด ในระบบ PGM-FI มีระบบควบคุมพื้นฐานอยู่ 3 ระบบ ดังรูปที่ 2.23

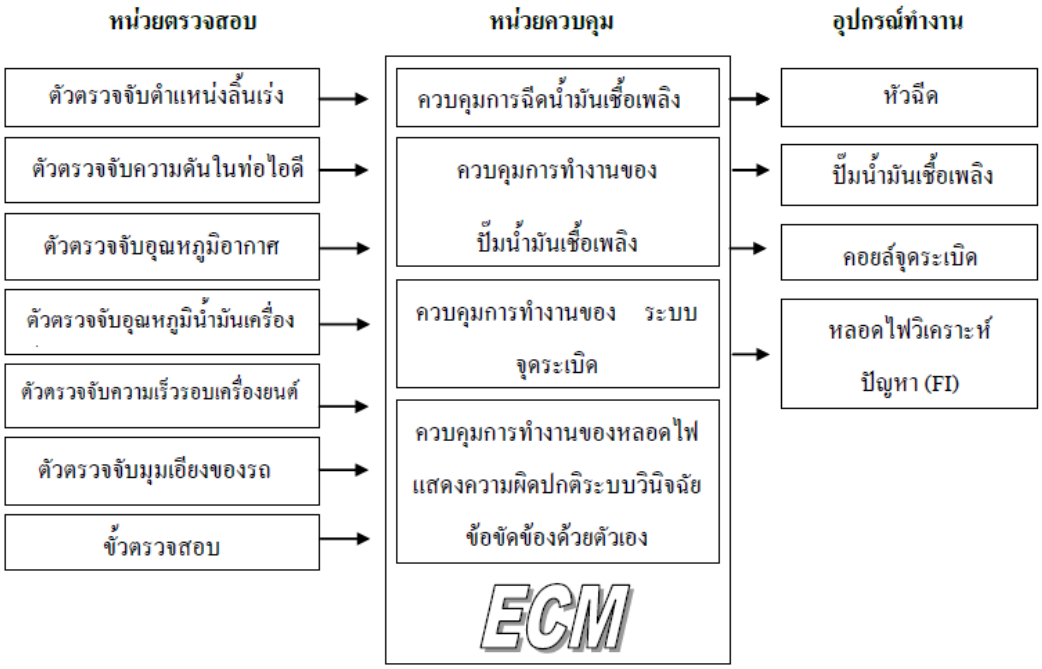
1.หน่วยตรวจสอบ เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic control system) คือระบบที่ทำการตรวจสอบสภาวะเครื่องยนต์ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวตรวจจับความดันในท่อไอดี ส่งสัญญาณทางไฟฟ้าบอกปริมาณอากาศในท่อไอดี สัญญาณจาก สัญญาณจากหน่วยส่งอื่นๆ (Sensors) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปยังหน่วยประมวลผล ECM เพื่อทำการปรับแก้อัตราส่วนผสมของ

อากาศและเชื้อเพลิง ซึง ECM จะคำนวณเวลาให้หัวฉีดฉีดเชื้อเพลิงเข้าในท่อไอดีในปริมาณที่เหมาะสมกับสภาพการทำงานของเครื่องยนต์

2.หน่วยควบคุม หรือ ECM (Electronic Control Module) ทำหน้าที่รับสัญญาณไฟฟ้าจากหน่วยตรวจสอบ เพื่อทำการประมวลผลหาอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมต่อสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

3.หน่วยอุปกรณ์ทำงาน ทำหน้าที่ดูดอากาศเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ และทำการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง พร้อมกับทำการจุดระเบิด เช่น หัวฉีด ปั๊มน้ำมัน คอยล์จุดระเบิด

ระบบควบคุมทั้ง 3 ระบบนี้จะทำงานประสานกันทำให้สามารถกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงที่เหมาะสมฉีดเข้าไปในท่อไอดี ทำให้อัตราส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงพอดีสำหรับการทำงานตามสภาวะการใช้งานของเครื่องยนต์ ซึ่งมีสภาวะการทำงานเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา



รูปที่ 2.23 แผนภูมิระบบควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐาน

4. การวัดปริมาณอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์ ในการควบคุมปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐานเป็นการควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องมีการวัดปริมาณอากาศที่

เข้าสู่เครื่องยนต์ ทั้งระบบ EFI-D และ EFI-L มีการวัดปริมาณอากาศด้วยวิธีต่างกัน ในระบบ EFI-D อาศัยหลักการทำงานของปีกผีเสื้อในการวัดปริมาณอากาศ กล่าวคือเมื่อปีกผีเสื้อเปิดน้อย ความดันในท่อไอดีจะมีค่าเกือบเป็นสุญญากาศ เมื่อเหยียบคันเร่งปีกผีเสื้อจะเปิดมากขึ้นทำให้ความดันในท่อไอดีมีค่าเกือบเท่าบรรยากาศ ดังนั้นระบบ EFI-D จึงอาศัยการวัดความดันในท่อไอดีเป็นตัวบอกปริมาณของอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ ส่วนในระบบ EFI-L นั้นวัดอัตราการไหลของอากาศโดยอาศัยมาตรวัดอากาศโดยตรง มาตรวัดอากาศที่ใช้มีหลายแบบ

5.การไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับวงจรน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น น้ำมันจากถังเก็บจะถูกอัดความดันโดยปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel pump) ไปสู่หัวฉีด (Injector) ผ่านไส้กรองน้ำมัน แต่ละกระบอกสูบของเครื่องยนต์จะมีหัวฉีด น้ำมันเชื้อเพลิงในระบบจะมีความดันคงที่โดยการควบคุมของตัวควบคุมความดัน (Pressure regulator) หัวฉีดเป็นแบบเข็มนมหนูไฟฟ้า (Solenoid valve) ซึ่งเข็มนมหนูจะยกขึ้นจากบ่าให้น้ำมันเชื้อเพลิงฉีดออกไปเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้า เข็มนมหนูจะยกขึ้นในจังหวะและเวลาที่เหมาะสม

6. จังหวะและเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง จากปริมาตรของอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ไม่ว่าจะวัดโดยอาศัยความดันในท่อไอดีหรือวัดจากมาตรวัดอากาศโดยตรง จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าส่งเป็นสัญญาณให้กับ ECM หรือหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ในเวลาเดียวกันสัญญาณไฟฟ้าแรงดันต่ำจากคอยล์จุดระเบิดก็จะถูกป้อนเข้า ECM ด้วยเพื่อบอกความเร็วรอบของเครื่องยนต์และจังหวะการจุดระเบิดของแต่ละกระบอกสูบ ECM จะคำนวณเวลาที่จะให้เข็มนมหนูหัวฉีดยกขึ้นว่าจะยกนานเท่าไรในช่วงใด

2.10 การออกแบบการทดลอง [19]

การทดลอง หมายถึง การทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรป้อนเข้า (Input Variables) ของกระบวนการหรือระบบเพื่อสังเกตผลและชี้บ่งสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงในผลลัพธ์ (Output Response) ที่ได้ ส่วนการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติและสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุผลได้ โดยวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจจะเกี่ยวข้องกับประเด็นต่างๆ ดังนี้

1. การหาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อค่าตัวแปรตอบสนอง (Response)

2. การหาวิธีการตั้งค่าของปัจจัยนำเข้า (Input) ที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนองเพื่อทำให้ได้ตัวแปรตอบสนองที่มีค่าตามที่ต้องการ

3. การหาวิธีการตั้งค่าของปัจจัยนำเข้า ที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนองเพื่อทำให้ความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด

4. การหาวิธีการตั้งค่าของปัจจัยนำเข้า ที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนองเพื่อให้ผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

2.11 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลองมี 3 ประการดังนี้

2.11.1 การทำซ้ำ (Replication)

การทำซ้ำ (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรก การทำซ้ำทำให้สามารถหาความผันแปรอันเนื่องมาจากปัจจัยที่ไม่ได้รับการควบคุม (Experimental Error) ในการทดลองได้ โดยตัวประมาณค่าความผันแปรนี้เป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่าความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ และประการที่สอง ทำให้สามารถหาตัวประมาณค่าที่ถูกต้องของค่าเฉลี่ยจากข้อมูลในการทดลอง

2.11.2 การสุ่ม (Randomization)

การสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่มซึ่งเป็นพื้นฐานหลักในการใช้วิธีการเชิงสถิติที่กำหนดข้อมูลต้องเป็นตัวแปรสุ่ม

ที่มีการกระจายแบบอิสระทั้งนี้เพื่อเป็นการลดผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่อาจเกิดขึ้นในการทดลอง

2.11.3 การสกัดกั้น (Blocking)

เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง โดยการบล็อกหมายถึง กลุ่มหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่มีความเหมือนกันมากกว่าวัสดุที่ใช้ทั้งหมด เพื่อต้องการให้เงื่อนไขในการทดลองมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด

2.12 แนวทางการดำเนินโครงการตามวิธีการออกแบบการทดลอง

แนวทางการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

2.12.1 การทำความเข้าใจถึงปัญหา (Problem Recognition & Statement)

ในการกำหนดหัวข้อของปัญหา ผู้ทดลองต้องทำความเข้าใจต่อสภาพของปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลองทั้งนี้เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการวางแผนและดำเนินการทดลองต่อไป

2.12.2 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Choice of Response Variable)

ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทดลองต้องแน่ใจว่าตัวแปรตอบสนองนี้ให้สารสนเทศที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ ทั้งนี้ต้องแน่ใจว่าระบบการวัดที่ใช้วัดตัวแปรตอบสนองต้องมีคุณภาพเพื่อให้ความผันแปรที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการประเมินและวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

2.12.3 การเลือกปัจจัยระดับและขอบเขตของปัจจัย (Choice of Factors and Levels)

ในขั้นตอนนี้เป็นการใช้ความรู้ทางเทคโนโลยีเฉพาะด้าน (Intrinsic Technology) เกี่ยวกับกระบวนการซึ่งอาจมาจากประสบการณ์หรือความรู้ทางทฤษฎีเพื่อนำมาตัดสินใจเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ต้องทำการปรับในการทดลอง รวมถึงต้องทราบวิธีการควบคุมและการวัดค่าระดับของปัจจัยดังกล่าวนี้ด้วย

2.12.4 การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design)

ในการเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการกำหนดขนาดของสิ่งตัวอย่าง (Replications) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล การเลือกว่าจะใช้หลักการพื้นฐานใดบ้างในการออกแบบ ซึ่งในการเลือกการออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองตลอดเวลา

2.12.5 การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment)

ในการดำเนินการทดลองเป็นการทำตามแผนการทดลองที่ออกแบบ ซึ่งจำเป็นต้องติดตามกระบวนการดำเนินการอย่างระมัดระวัง เนื่องจากหากมีสิ่งผิดพลาดเกิดขึ้นจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้

2.12.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะมีการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ เพื่อพิจารณาว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ควรใช้ความรู้ทางวิศวกรรมหรือความรู้เกี่ยวกับกระบวนการที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่มีเหตุผลและมีความน่าเชื่อถือ

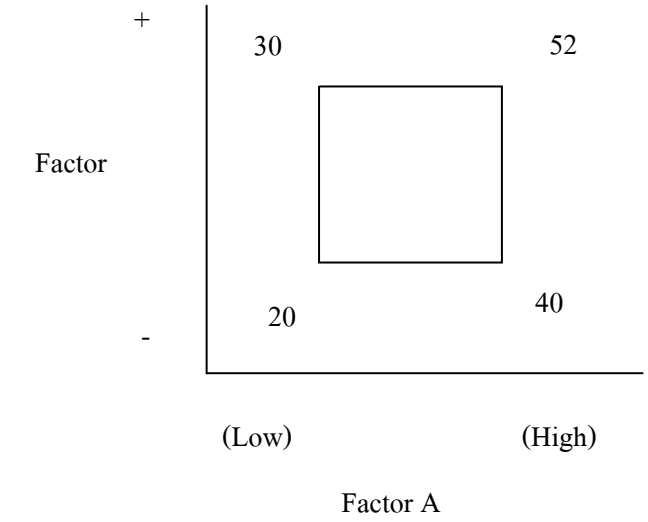
2.12.7 การสรุปผลและการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Conclusion and Confirmation Testing)

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลแล้วผู้ทดลองต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติของกระบวนการที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้ควรนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วยในการนำเสนอข้อมูล นอกจากนี้แล้วควรทำการทดลองเพื่อยืนยันผลอีกครั้งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

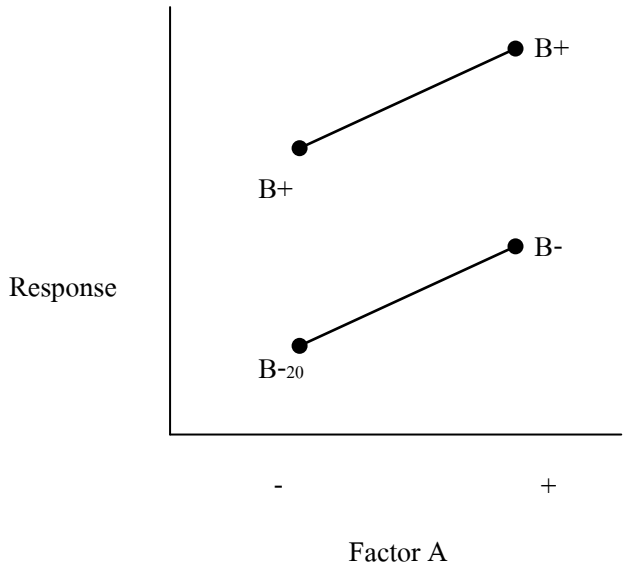
2.13 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัย (Level of factors) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณีปัจจัย 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการ

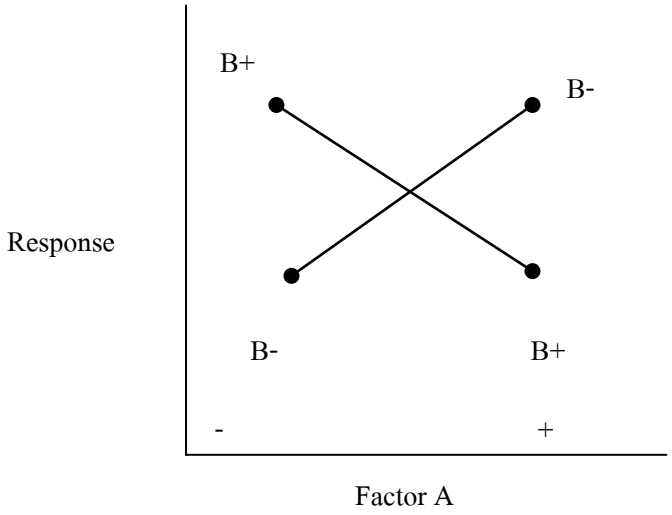
ทดลอง 1 เรพลิเคต (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จะระบุว่าปัจจัยมีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ เรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) ดังแสดงตัวอย่างในรูป 2.24 2.25 และ 2.26 โดยรูปที่ 2.24 แสดงถึงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลของปัจจัยที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ รูปที่ 2.25 แสดงถึงการไม่มีอิทธิพลร่วม (Non – Interaction) ของปัจจัย และรูปที่ 2.26 แสดงการมีอิทธิพลร่วม (Interaction) ของปัจจัย



รูปที่ 2.24 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย



รูปที่ 2.25 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (ไม่มีอันตรกิริยา)



รูปที่ 2.26 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (มีอันตรกิริยา)

2.14 ประเภทของการทดลอง

2.14.1 การออกแบบการทดลองแบบ General full factorial

ในตัวแบบของ General full factorial การทดลองแต่ละครั้งในแต่ละปัจจัยจะมีค่าระดับหลายๆค่า ตัวอย่างเช่นปัจจัย A มี 2 ระดับ ปัจจัย B มี 3 ระดับ และ ปัจจัย C มี 5 ระดับ การทดลองในทุกรันจะทำครบทุกค่าระดับของทุกปัจจัย ตัวแบบGeneral full factorial อาจจะนำไปใช้ในการทดลองขนาดเล็กเพื่อทำการคัดเลือกปัจจัย (Screening) หรือ เพื่อทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

2.14.2 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 2^k

ใช้กันมากในการทดลองที่ต้องการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป และผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยต่างๆ ดังนั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียลนี้จึงเป็นการทดลองที่ให้สารสนเทศครบและพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบการทดลองขั้นสูงต่อไป

กรณีที่มีปัจจัยอยู่เป็นจำนวนมากสิ่งสำคัญคือปัญหาที่เกี่ยวข้องกับผลของอิทธิพลร่วมต่างๆซึ่งหากละเลยหรือไม่สนใจแล้วอาจทำให้การตีความหมายผิดพลาดไปได้แต่การที่ต้องการรู้ถึงผลของปัจจัย

จำนวนมากนั้นเป็นเหตุให้การทดลองมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจไปกระทบกับต้นทุนการผลิต หรือการทดลองนั้นยังมีความรู้ในงานที่ต้องการศึกษาไม่สูงนัก มีความจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบเพื่อกรอง (Screening Design) ปัจจัยต่างๆที่สงสัยออกไปก่อน ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบนี้เรียกว่า 2^k แฟกทอเรียล

2 หมายถึง จำนวนระดับ (Level)

k หมายถึง จำนวนปัจจัย (Factor)

การทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล เป็นการทดลองที่มีจำนวนของปัจจัยเท่าไหร่ก็ได้ตามแต่ที่กำหนด แต่จำนวนของระดับที่ใช้ในการทดลองนั้นมีเพียง 2 ระดับเท่านั้นในทุกๆปัจจัยที่ทำการศึกษาการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลาเป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2 x 2 x 2 x….x2 = 2^k ข้อมูล และเรียกว่าการออกแบบลักษณะว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้ออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

2.14.3 การวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์

เป็นแผนการทดลองที่ง่ายที่สุด โดยที่สิ่งทดลองถูกสุ่มจัดลงในหน่วยการทดลอง เป็นแผนที่มีประสิทธิภาพดีมากถ้าหน่วยของการทดลองมีความสม่ำเสมอ และประยุกต์ใช้ในงานพัฒนาสูตร การพัฒนากรรมวิธีการผลิต การศึกษาอายุการเก็บ การทดสอบทางประสาทสัมผัส การสุ่มไม่จำเป็นต้องทำซ้ำเท่ากัน แต่เพื่อความสะดวกนิยมใช้เท่ากัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว โดยที่ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากสิ่งทดลองเท่านั้น ดังสมการที่ (2.6)

$$\text{Model};\ Y_{ij} = \mu + T_i + E_{ij} \qquad (2.6)$$

เมื่อ Y_{ij} = ค่าสังเกตจากสิ่งทดลอง

μ = ค่าเฉลี่ยทั้งหมดในการทดลอง

T_i = อิทธิพลของสิ่งทดลองที่ i

E_{ij} = ความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ข้อดี

- คำนวณง่าย ไม่สลับซับซ้อน
- วางแผนการทดลองง่าย
- ความแม่นยำสูงกว่าวิธีการอื่นๆ เพราะว่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error) มีขนาดใหญ่
- จำนวนครั้งหรือซ้ำ ที่เก็บข้อมูลของตัวแปร ค่าไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

ข้อเสีย

- ต้องสามารถควบคุมปัจจัยอื่นๆได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ตัวอย่างที่ทำการศึกษาต้องไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลอื่นๆ (ปัจจัยภายนอก) ยกเว้นปัจจัยที่ทำการศึกษา หากไม่สามารถควบคุมปัจจัยภายนอกแล้วผลการวิเคราะห์จะมีความผิดพลาดมากกว่ารูปแบบการวิเคราะห์อื่นๆ

2.15 การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis) เป็นกระบวนการตัดสินใจเพื่อยืนยันความเชื่ออย่างใดอย่างหนึ่งเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่อธิบายสภาวะที่เกิดขึ้นจริง และเรียกข้อความที่แสดงถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่หมายถึงสภาวะที่เกิดขึ้นจริงว่าสมมติฐานเชิงสถิติ (Statistical Hypothesis) ได้แก่ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis; H0) และสมมติฐานอื่น (Alternative Hypothesis; H1) โดยสมมติฐานหลัก คือ สมมติฐานที่เชื่อว่าเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริงและต้องทำการทดสอบเพื่อที่จะปฏิเสธสมมติฐานนี้ ส่วนสมมติฐานอื่น คือ สภาวะที่ต้องการยืนยันด้วยเหตุผล และการตัดสินใจแบบทดสอบสมมติฐานนี้มีโอกาสในการผิดพลาดได้ 2 ชนิด คือ

- ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error): การปฏิเสธสมมติฐานหลักทั้งที่ในความเป็นจริงสมมติฐาน

หลักถูกต้องอยู่แล้ว เรียกว่าระดบนัยสำคัญ (Significant Level) แทนด้วยสัญลักษณ์ α

- ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error): การไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักทั้งที่ในความเป็นจริง สมมติฐานหลักไม่ถูกต้องแทนด้วยสัญลักษณ์ β และ 1-β คืออำนาจในการทดสอบ (Power of Test)

ในการทดสอบสมมตฐานนั้นต้องออกแบบวิธีการตัดสินใจให้มีระดับนัยสำคัญคงที่และมีค่าต่ำๆ เช่น 0.05 หรือ 0.1 และให้อำนาจในการทดสอบมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้การตัดสินใจเลือก H1 ต้องกระทำอย่างมีเหตุผลรองรับที่ชัดเจนจริงๆ ซึ่งเรียกว่า การตัดสินใจแบบยืนยัน (Strong Conclusion) ซึ่งในการตัดสินใจโดยการทดสอบสมมติฐานสามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมติฐานตามสิ่งที่ต้องการทดสอบ

2. กำหนดวิธีการตัดสินใจ ด้วยการพิจารณาถึงตัวสถิติสำหรับการทดสอบพารามิเตอร์ รวมถึงการแจกแจงของตัวสถิติดังกล่าว ซึ่งอธิบายขนาดความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขของการทดลอง (Reproducibility) และกำหนดช่วงการปฏิเสธและการยอมรับภายใต้ค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด

3. ออกแบบการทดลอง ด้วยการกำหนดขนาดตัวอย่างโดยให้อำนาจในการทดสอบอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

4. ดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบไว้

5. ตัดสินใจตามวิธีการตัดสนใจที่กำหนดไว้ โดยหากข้อมูลอยู่ภายในช่วงการยอมรับให้สรุปว่าไม่มีเหตุผลในการปฏิเสธสมมติฐาน เนื่องจากข้อมูลอยู่ภายในช่วงความผันแปรที่เกิดจากสาเหตุธรรมชาติ แต่หากข้อมูลอยู่ในช่วงการปฏิเสธให้ทำการปฏิเสธสมมติฐาน