บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรื่องผลของออกซิเจนในไอเสียต่อสมรรถนะและมลภาวะของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันเบนซินผสมสารออกซิเจนเนต ได้แก่ทฤษฎีที่เกี่ยวกับสารออกซิเจนเนต คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเมื่อผสมสารออกซิเจนเนต แนวคิดในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินผสมสารออกซิเจนเนต ระบบ Feed Back Control ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงของรถยนต์ในปัจจุบัน และการปรับปรุงระบบ Feed Back Control เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินผสมสารออกซิเจนเนต

2.1 สารออกซิเจนเนต

ประมาณ 60 ปีมาแล้วที่ได้มีการนำสารตะกั่วมาเติมลงในน้ำมันเบนซินเพื่อเพิ่มค่าออกเทน (Octane Number) ทำให้น้ำมันเบนซินมีคุณสมบัติเหมาะสมกับเครื่องยนต์ สารตะกั่วดังกล่าวได้แก่ ตะกั่วเตตราเอทิล (Tetraethyl Lead, TEL) และในปี ค.ศ. 1965 มีการนำตะกั่วเตตราเมทิล (Tetramethyl Lead, TML) มาใช้ โดยให้ผลเช่นเดียวกัน [2]

ปัญหาที่ตามมาก็คือน้ำมันเบนซินที่ผสมตะกั่วเตตราเอทิลหรือตะกั่วเตตราเมทิล เมื่อเกิดการเผาไหม้ทำให้เกิดสารประกอบของตะกั่วเช่นตะกั่วคลอไรด์ ตะกั่วโบรไมด์ และตะกั่วออกไซด์ เป็นต้น ฟุ้งกระจายไปในอากาศและเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิต ทั้งทางผิวหนัง ทางปาก และการหายใจ

พิษของสารตะกั่วก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย ทั้งทางตรงและทางอ้อม ในลักษณะที่ค่อยๆ สะสมและเกิดอาการต่างๆ เช่น อ่อนเพลีย มีผลต่อระบบทางเดินอาหาร สะสมในไต ตับ หัวใจ และสมอง ทำให้เกิดอาการทางประสาท สมองไม่เจริญเติบโตตามปกติ เป็นโรคโลหิตจาง ถ้าเกิดสะสมในเด็ก ทำให้เป็นอัมพาต นอกจากนี้ยังพบว่า พิษจากสารตะกั่ว สามารถถ่ายทอดไปสู่ทารกในครรภ์ได้ และทำอันตรายต่อระบบสืบพันธุ์ ทำให้เป็นหมันหรือแท้ง รวมทั้งเป็นสาเหตุ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ของมะเร็งในอวัยวะต่างๆ เช่น กระเพาะอาหาร ลำไส้ ตับ ไต ต่อมไทรอยด์ ต่อมลูกหมาก และไขกระดูก เป็นต้น

ปัจจุบัน ประเทศไทยตระหนักถึงภัยอันตรายของสารตะกั่วดังกล่าว จึงได้พยายามหาวิธีลดสารตะกั่วในน้ำมันเบนซิน และได้นำสารชนิดอื่นๆ มาใช้แทน ตะกั่วเตตราเอทิล หรือ ตะกั่วเตตรา-เมทิล สารที่ได้ใช้ทดแทนในปัจจุบันคือ สารประกอบออกซิเจน (Oxygenated Compounds) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล ได้แก่ แอลกอฮอล์ และอีเทอร์

สารออกซิเจนเนตที่เติมลงไปนั้นจะช่วยปรับให้ค่า Octane, Volatility และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น อันมีผลต่อสมรรถนะของยานยนต์ อาทิเช่น เพิ่ม road antiknock performance (Acceleration Knock จะดีขึ้นเนื่องมาจากค่า RON ของเชื้อเพลิงสูงขึ้น) และทำให้ drivability ของยานยนต์ดีขึ้น เครื่องยนต์จะสามารถทำงานที่ส่วนผสมบางใกล้ lean limit ของการสันดาปอันจะนำมาซึ่งการประหยัดเชื้อเพลิง (fuel economy) พร้อมการลดปริมาณ CO, HC emissions ลง โดยมีผลกระทบต่อปริมาณการเกิด NO_x น้อย [1] ในงานวิจัยนี้ได้เลือกที่จะศึกษาสารออกซิเจนเนต 2 ชนิดคือ Ethanol และ MTBE

2.1.1. Ethanol

Ethanol (CH_3CH_2OH) เป็น Monohydric Alcohol จากการที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงมีค่า Heating Value ต่ำกว่าเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่มีสัดส่วน H/C เดียวกัน ดังนั้นที่สัดส่วนผสม Stoichiometric จึงต้องการสัดส่วนอากาศน้อยกว่า ทำให้ค่า Heating Value รวมของ Mixture ไม่แตกต่างจากน้ำมันเบนซินมากนัก Ethanol มีคุณสมบัติป้องกันการน็อคได้สูง บางประเทศ จึงใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน เช่นแถบอเมริกาใต้ และบางแห่งในสหรัฐอเมริกา

เนื่องจาก Ethanol ละลายน้ำได้ จึงเป็นอุปสรรคที่อาจก่อให้เกิดปัญหาในด้านการแยกตัวออกจาก Gasoline Base และปัญหาการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นปัญหาหลักในการที่จะนำมาใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน แต่ก็มีความเป็นไปได้ถ้าควบคุม Water content ใน Ethanol ให้ต่ำกว่า 1% (vol.) และไม่มีสารประกอบของ Alcohol ที่เป็น Diluent (Alcohol ที่มีกลุ่ม OH มากกว่า 1 กลุ่ม) นอกจากนี้ Ethanol ทำปฏิกิริยากับสีและยางพลาสติกบางชนิดได้ จึงทำให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น มีปัญหาในการเก็บรักษาและความคงที่ของคุณภาพการผลิตไม่แน่นอน

2.1.2. Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE)

MTBE ($C_4H_9OCH_3$) เป็นสารประกอบกลุ่ม Ether ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อประมาณ ค.ศ. 1960 จากปฏิกิริยาระหว่างไอโซบิวทีลีนและเมทานอล ซึ่งต่อมา MTBE ได้กลายเป็นสารเพิ่มค่าออกเทนที่ได้รับความสนใจมากที่สุด มีค่า Heating Value สูงกว่า Ethanol แต่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่มีสัดส่วน H/C เดียวกัน เนื่องจากมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซินจึงผสมกับน้ำมันเบนซินได้เป็นอย่างดี ไม่มีปัญหาการแยกตัวออกจาก Gasoline Base MTBE ไม่กัดกร่อนโลหะ ดังนั้นจึงไม่เกิดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ไม่ก่อปัญหาให้เครื่องยนต์ทั้งเก่าและใหม่ ไม่มีพิษ ไม่ก่อให้เกิดยางเหนียว ขนส่งและเก็บรักษาง่าย [2]

2.1.3. ผลจากการผสมสารออกซิเจนเนตต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

2.1.3.1. ค่าออกเทน

ค่าออกเทนเป็นตัวเลขที่บอกถึงคุณภาพการต้านทานการน็อค (Antiknock Quality) หรือความสามารถของน้ำมันเบนซินที่จะเผาไหม้โดยปราศจากการน็อค (Knock) ในเครื่องยนต์ แต่ละเครื่องยนต์จะมีความต้องการเชื้อเพลิงที่มีค่า Octane ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างอาทิ Engine Design; Operating Temperature, Humidity, Altitude, Spark timing, Combustion Chamber Deposits, ระบบท่อไอเสีย; และวิธีการขับขี่

ทั้ง Ethanol และ MTBE มีค่าออกเทนสูง ดังนั้นเมื่อเติมในน้ำมันเบนซินจะช่วยเสริมให้ค่า Octane ของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าดัชนีกันน็อก (Anti-knock Index) สูงขึ้น

2.1.3.2. ความดันไอ (Vapor Pressure)

ความดันไอคือความดันของไอเหนือเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปของของเหลวซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุล ความดันไอมีผลกับการทำงานของเครื่องยนต์เป็นอย่างมาก โดยมีผลต่อการสตาร์ทเครื่องยนต์, การอุ่นเครื่องยนต์และการกระจายของไอน้ำมันไปยังกระบอกสูบแต่ละกระบอกสูบ น้ำมันต้องไม่ระเหยมากเกินไปจนเกิดเป็นไอระหว่างส่งเข้ามาตามท่อ ทำให้เกิด Vapor Lock และต้องไม่น้อยเกินไปจนเกิดการละลายลงในถังน้ำมันเครื่องได้ [3] โดยพบว่า Ethanol มีความดันไอสูงกว่าความดันไอของน้ำมันเบนซินทั่วไป และ MTBE มีความดันไอต่ำกว่าความดันไอของน้ำมันเบนซินทั่วไป

2.1.3.3. การรวมตัวกับน้ำ

Ethanol ละลายน้ำได้ดี จึงทำให้เกิดปัญหาอันเนื่องจากเกิดการแยกตัวออกจาก Gasoline Base

MTBE บริสุทธิ์จะดูดน้ำได้เล็กน้อย แต่ไม่ดูดความชื้นในอากาศ เมื่อ MTBE เป็นส่วนผสมในน้ำมันเบนซินแล้ว ความสามารถในการดูดน้ำหรือละลายในน้ำจะใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซินทั่วไป

2.1.3.4.การกัดกร่อน

เนื่องจาก Ethanol สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะ สี และยางบางชนิดได้ เมื่อ Ethanol ผสมกับน้ำมันเบนซินจึงเกิดการกัดกร่อนโลหะหรือยาง

เมื่อ MTBE ผสมกับน้ำมันเบนซินแล้ว ไม่มีสมบัติกัดกร่อนโลหะหรือยางชนิดต่างๆ แต่อย่างใด

2.1.3.5.ความเป็นพิษ

Ethanol เป็นสารที่ได้จากธรรมชาติและนำมาใช้บริโภคได้ จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency, EPA) วิจัยแล้วพบว่า MTBE ไม่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิต [2]

2.1.3.6.ค่าความร้อน

ทั้ง Ethanol และ MTBE มีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันเบนซิน โดย MTBE มีค่าความร้อนสูงกว่า Ethanol ประมาณ 30% [2]

2.1.4.คุณสมบัติจำเพาะของสารออกซิเจนเนต

สารออกซิเจนเนตที่ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินที่ใช้ในการทดสอบ มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1 [4]

ตาราง 2.1 คุณสมบัติจำเพาะของสารออกซิเจนเนต

Property	Ethanol	MTBE
Chemical formula	CH_3CH_2OH	$(CH_3)_3COCH_3$
Molecular Weight	46.07	88.15
Composition, weight %		
Carbon	52.2	68.1
Hydrogen	13.1	13.7
Oxygen	34.7	18.2
Specific Gravity 60 $^{\circ}$F/60 $^{\circ}$F	0.794	0.744
Reid Vapor Pressure, psi	2.3	7.8
Viscosity		
Centipoise @ 68 $^{\circ}$F	1.19	0.35
Centipoise @ -4 $^{\circ}$F	2.84	0.60
Flash Point, closed cup, $^{\circ}$F	55	-14
Autoignition Temperature, $^{\circ}$F	793	815
Flammability Limits, Volume %		
Lower	4.3	1.6
Higher	19.0	8.4
BONV in 87 (R+M)/2 UL gasoline		
RON	129	116
MON	102	103
(R+M)/2	115	110
Latent Heat of Vaporization,		
Btu/gal @ 60 $^{\circ}$F	2378	863
Btu/lb @ 60 $^{\circ}$F	396	138
Lower Heating Value (liquid fuel-water) Btu/lb	11500	15100
Stoichiometric A/F Ratio	9.0	11.7

BONV = Blending octane value = [ONB-ONG(1-X)]/X

โดยที่ ONB = octane number of gasoline/component blend;

ONG = Octane number of base gasoline;

X = volume fraction of blending component

2.2 แนวคิดในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินผสมสารออกซิเจนเนต

สมมติฐานจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อทดสอบเครื่องยนต์ TOYOTA 4A-FE โดยใช้น้ำมันเบนซินผสมสารออกซิเจนเนตพบว่าค่า Fuel Consumption มีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันเบนซินธรรมดา [1]

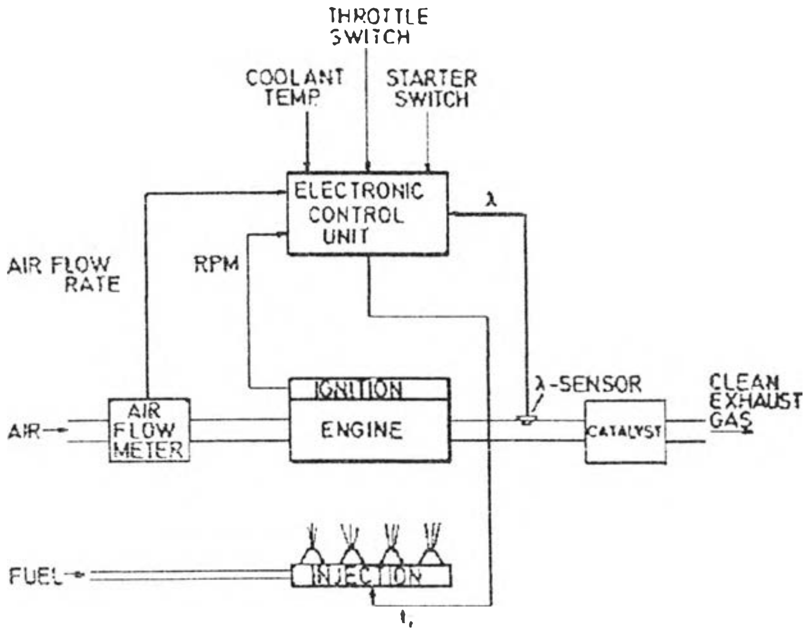
เนื่องจากในสารออกซิเจนเนตมีโมเลกุลของออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นขณะที่น้ำมันเบนซินที่ผสมสารออกซิเจนเนตถูกฉีดจากหัวฉีดไปยังห้องเผาไหม้ จะมีน้ำมันส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถปลดปล่อยพลังงานเคมีจนหมดภายในเครื่องยนต์ระหว่างขบวนการเผาไหม้ อันเนื่องมาจาก combustion efficiency ของเครื่องยนต์ [5] ซึ่งน้ำมันส่วนนี้จะปลดปล่อยออกซิเจนอิสระออกมา จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนในไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น Oxygen Sensor จึงส่งสัญญาณให้ ECU ว่าในขณะนี้ส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงบาง ECU จึงพยายามควบคุมให้อัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงมีค่าใกล้กับ stoichiometric โดยการเพิ่มเวลาในการทำงานของหัวฉีด ทำให้ระบบจ่ายน้ำมันฉีดน้ำมันไปยังห้องเผาไหม้มากขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนี้จึงทำให้ Fuel Consumption ของเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

2.3 ระบบ Feed Back Control

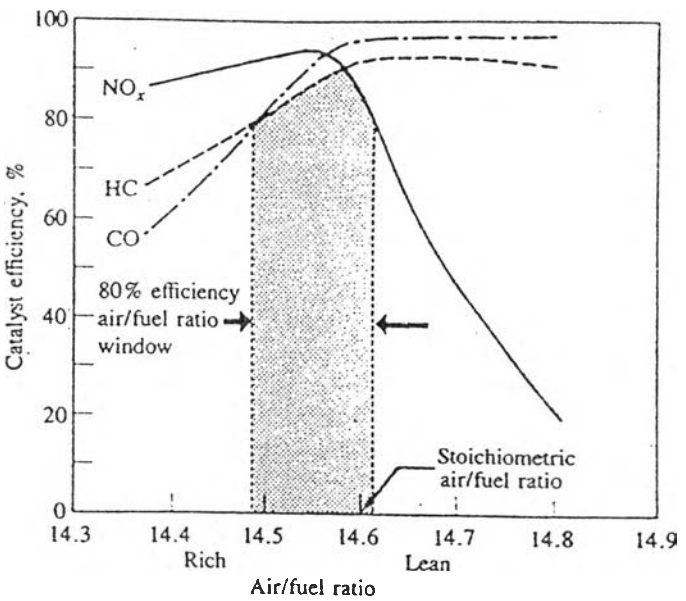
ในปัจจุบันเครื่องยนต์ OEM ใช้ระบบ Feed Back Control (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ควบคุมส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงให้มี A/F ratio ใกล้เคียงกับ stoichiometric ในทุกสภาวะการทำงาน เพื่อทำให้ Three-way Catalytic Converter มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซมลพิษหลัก 3 ชนิดคือ CO, HC และ NO_x จากไอเสียสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การควบคุมเครื่องยนต์ให้ A/F Ratio อยู่ในช่วง stoichometric ทำได้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณออกซิเจนที่ท่อไอเสียก่อนถึง Catalytic Converter โดยทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยัง ECU ซึ่งจะแปรสัญญาณส่งไปยังระบบจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อควบคุมให้เครื่องยนต์ทำงานที่ stoichiometric

ออกซิเจนเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณออกซิเจนในไอเสียประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่ทำจากเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2 เป็นเซรามิกชนิดหนึ่ง) ซึ่งจะถูกเคลือบผิวบางๆ ที่ด้านในและด้านนอกด้วยแพลตทินัม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อากาศจากบรรยากาศจะสัมผัสกับผิวด้านในและที่ผิวด้านนอกของเซ็นเซอร์จะสัมผัสกับไอเสีย ถ้าออกซิเจนด้านในของเซอร์โคเนียเข้ม

ข้นกว่าผิวด้านนอกที่อุณหภูมิสูง (400 °C หรือสูงกว่า) สารเซอร์โคเนียจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าส่งไปยัง ECU ของเครื่องยนต์ตลอดเวลา ตามความเข้มข้นของออกซิเจนในไอเสีย [6]

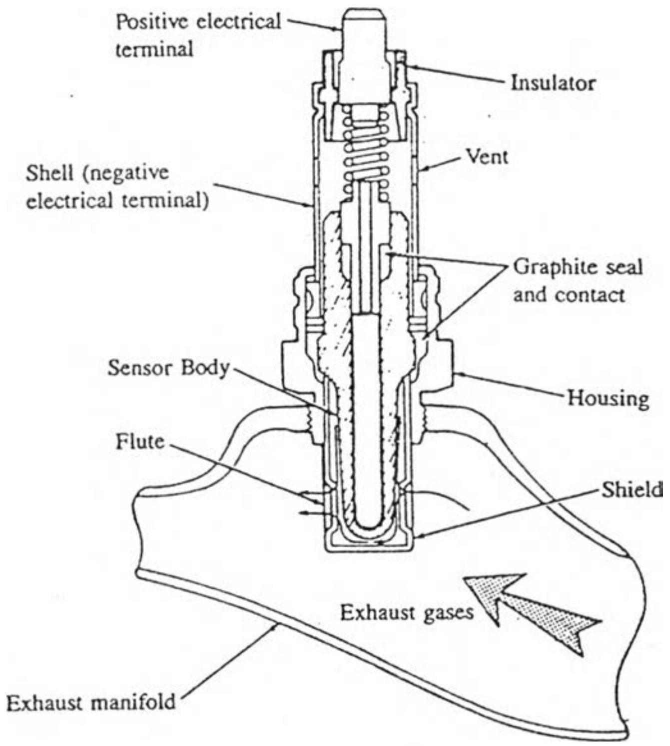


รูปที่ 2.1 Feed Back Control EFI [6]

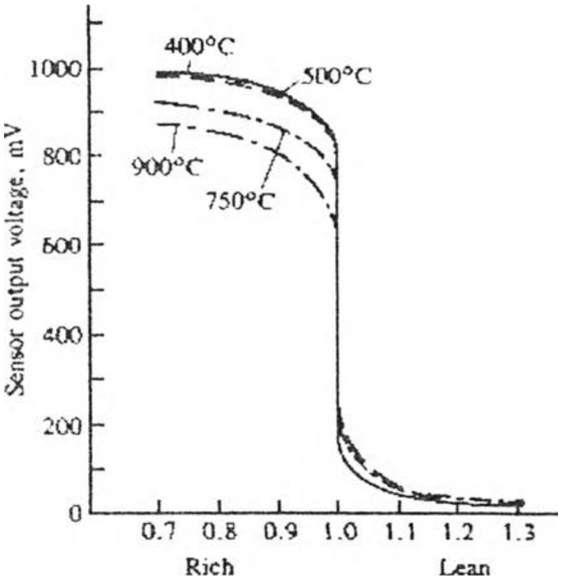


รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Catalyst Efficiency กับ A/F Ratio ค่าต่างๆ [5]

เมื่อส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงบางจะมีออกซิเจนในไอเสียเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนภายในและภายนอกเซ็นเซอร์เพียงแค่เล็กน้อย นั่นคือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากสารเซอร์โคเนียจะต่ำ (ใกล้กับ 0 volt) ในทางตรงข้าม ถ้าส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงหนา ออกซิเจนในไอเสียแทบจะไม่มีเลย จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนภายในและภายนอกเซ็นเซอร์มาก ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสารเซอร์โคเนียจะมีค่ามาก (ประมาณ 1 volt) ดังแสดงในรูป 2.4 สัญญาณที่ออกจากเซ็นเซอร์จะเป็นข้อมูลให้ ECU เครื่องยนต์ กำหนดให้เพิ่มหรือลดปริมาณการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อที่จะรักษาให้ส่วนผสมอยู่ในช่วง stiochiometric [6]

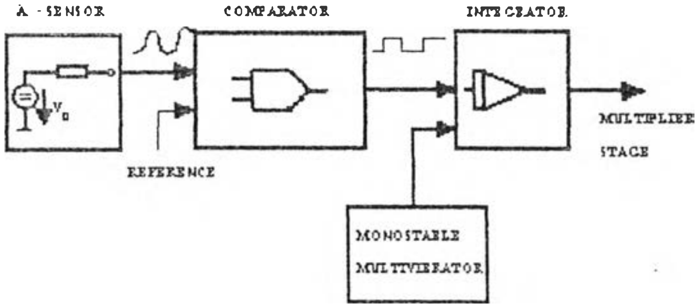


รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางของ Oxygen Sensor ที่ยึดติดกับผนังของ Exhaust Manifold [5]



รูปที่ 2.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สร้างจาก Oxygen Sensor

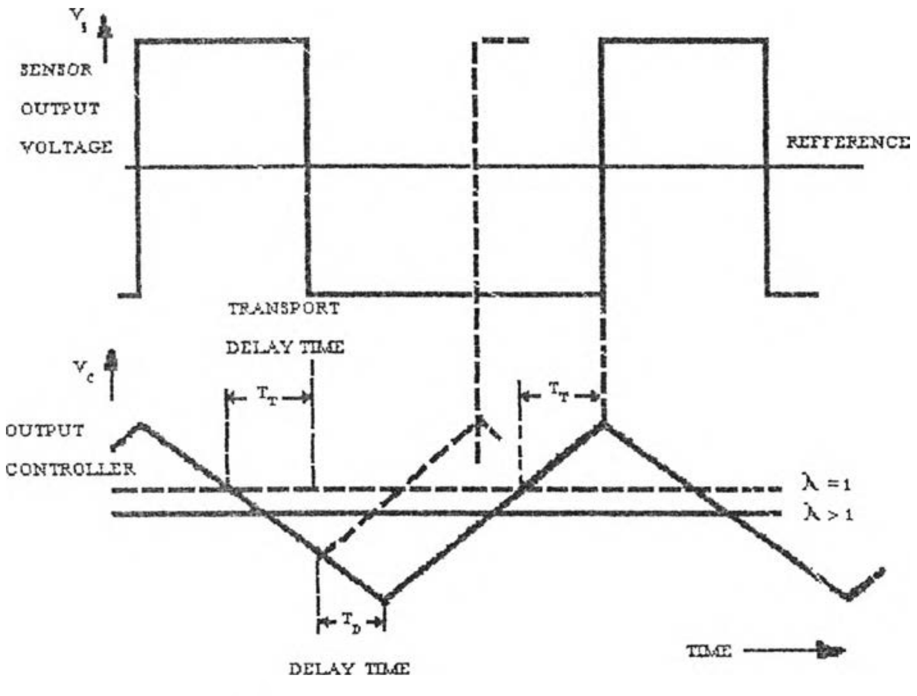
หลักการทำงานของวงจรควบคุมสามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้ สัญญาณที่สร้างจาก Oxygen Sensor เมื่อป้อนให้กับ ECU แล้ว Comparator ใน ECU จะเปรียบเทียบสัญญาณดังกล่าวกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอ้างอิง (reference voltage) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สัญญาณที่ออกจาก Comparator ซึ่งเป็นสัญญาณ square wave ถูกส่งไปยัง Integrator สัญญาณ square wave จาก Monostable Multivibrator จะป้อนให้กับ Integrator เพื่อเปลี่ยนแปลง duty ratio ของสัญญาณของ Comparator ในกรณีที่ต้องการทำงานที่สภาวะ $\lambda \neq 1$ [7]



รูปที่ 2.5 Block Diagram ของ Controller

รูปที่ 2.6 แสดงสัญญาณออกจาก Controller (Integrator) และรูปร่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของสัญญาณที่ออกจาก Comparator เส้นประแสดงถึงการทำงานปรกติที่จุด stoichiometric ($\lambda = 1$) เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าของสัญญาณสูง นั่นหมายถึงส่วนผสมหนา ในช่วงนี้ Controller จะลดเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงดังนั้นส่วนผสมจะบางลง จนกระทั่งถึงจุดที่ส่วนผสมมีอัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ที่ stoichiometric แต่เนื่องจากมี Transport Delay Time, T_T ซึ่ง Oxygen Sensor จะตอบสนองหลังเวลานั้น เพราะฉะนั้น Controller ยังคงเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงหลังจาก Oxygen Sensor ตอบสนอง, จะส่งสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำให้กับ Comparator ดังนั้น Controller จะเพิ่มเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ส่วนผสมหนาขึ้นอีกครั้ง

ถ้าสัญญาณออกจาก Controller ยังคงลดเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงในช่วง Delay Time, T_D แม้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของสัญญาณจาก Oxygen Sensor จะเปลี่ยนจากสูงมายังต่ำแล้ว ส่วนผสมจะเริ่ม lean ขึ้นกว่า stoichiometric ด้วยเหตุนี้ส่วนผสมจะถูกปรับให้มีค่า $\lambda > 1$ Delay Time, T_D จะลดลงโดย Monostable Multivibrator ด้วยการ trigger ความชันที่เป็นลบของสัญญาณออกซิเจนเซ็นเซอร์ ความชันที่เป็นบวกของสัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้ส่วนผสมมีค่า $\lambda < 1$ เพื่อจะทำให้ Reference Adjustment เป็นอิสระต่อ Transport Delay Time, T_T



รูปที่ 2.6 Reference adjustment of λ-control

2.4 การปรับปรุงระบบ Feed Back Control เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินผสมสารออกซิเจนเนต

จากงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ SI ที่ผ่านมาพบว่าหากสามารถปรับส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมจะปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ให้สูงกว่าเครื่องยนต์ OEM ได้ [1] ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงระบบ Feed Back Control ของเครื่องยนต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยการพัฒนาอุปกรณ์จากวงจรอิเลคทรอนิคพื้นฐานที่สามารถปรับแปรปริมาณออกซิเจนในไอเสีย เพื่อใช้ควบคุมส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

โดยอุปกรณ์ดังกล่าวนี้คือวงจร Simulated Oxygen Signal ทำหน้าที่จำลองสัญญาณปริมาณออกซิเจนในไอเสียเพื่อป้อนให้กับ ECU แทนสัญญาณที่สร้างขึ้นจาก Oxygen Sensor สัญญาณที่สร้างขึ้นจะอยู่ในรูปของ square wave โดยมีแอมปลิจูดของสัญญาณอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 Volt และสามารถปรับแปรค่าความถี่และความกว้างของสัญญาณได้ รายละเอียดเกี่ยวกับการพัฒนาและสร้างวงจร Simulated Oxygen Signal อยู่ในภาคผนวก ก.