

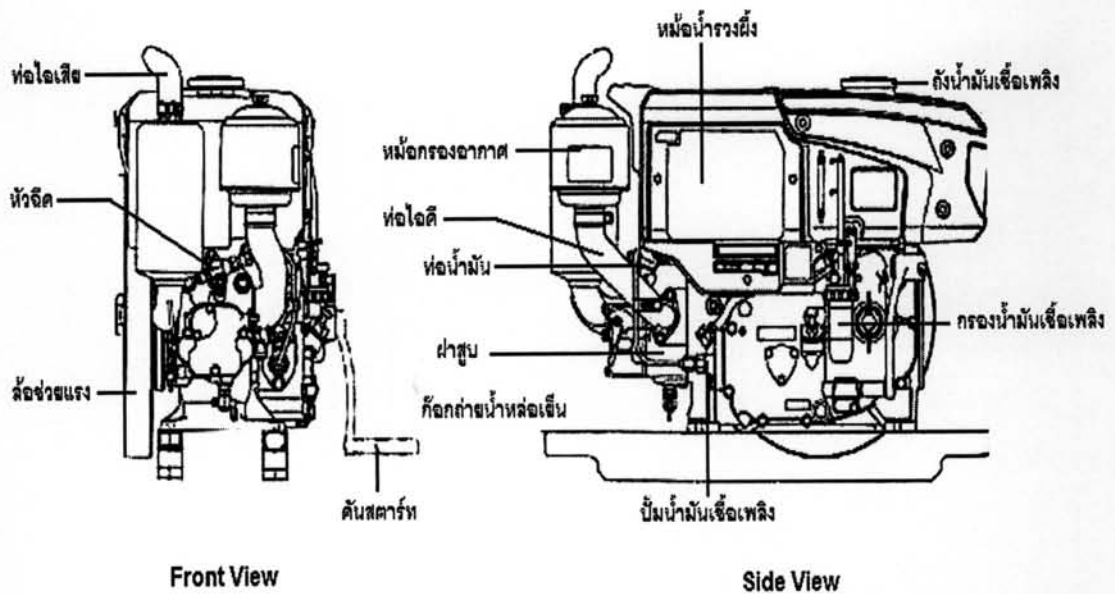
## บทที่ 5

### อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

#### 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ

##### 5.1.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะ

เครื่องยนต์ที่ถูกดัดแปลงให้เป็นเครื่องยนต์ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ CI ชนิด IDI ยี่ห้อ Kubota รุ่น RT-120 ดังแสดงในรูปที่ 5-1 โดยแสดงข้อมูลทางเทคนิคในตารางที่ 5-1



รูปที่ 5-1 แสดงเครื่องยนต์ทดสอบสมรรถนะ

ตารางที่ 5-1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบสมรรถนะ

เครื่องยนต์	Kubota
รุ่น	RT120
ชนิด	Single cylinder (ลูกสูบเคลื่อนที่ในแนววนอน)
ระบบห้องเผาไหม้	Swirl chamber (IDI)
ขนาดกระบอกสูบ	94 mm. (bore)
ช่วงชัก	90 mm. (stroke)
ปริมาตรกระบอกสูบ	624 cc.
แรงม้าสูงสุด	12 hp / 2400 rpm

ตารางที่ 5-1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบสมรรถนะ (ต่อ)

แรงบิดสูงสุด	4.0 kg-m / 1600 rpm
อัตราส่วนกำลังอัด	21 : 1
หัวฉีด	ประเภท: เข็มบานปลาย ความดัน: 140 kg/cm <sup>2</sup>
ปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิง	ประเภท: อีสระ หรือลูกสูบ ความดัน: 600 kg/cm <sup>2</sup>
ระบบหล่อลื่น	ฉีดส่งโดยปั๊มแบบ rotary SAE 40 API CC ความจุ 2.8 ลิตร
ระบบระบายความร้อน	หม้อน้ำแบบหม้อน้ำรังผึ้ง ระบายความร้อน แบบ Natural Convection ความจุ 2.2 ลิตร
หม้อกรองอากาศ	แบบเปียก

#### 5.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

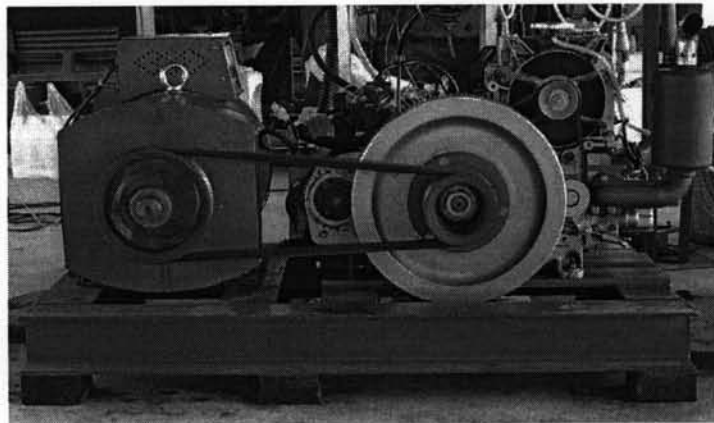
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นแบบกระแสสลับ (A.C. Synchronous Generators) ยี่ห้อ KODAI ชนิด สร้างกระแสไฟฟ้าโดยให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดทองแดง (stationary armature) ดังมีรายละเอียดทางเทคนิคดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 แสดงรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กำลัง (kW)	10
แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volt)	230/115
กระแสไฟฟ้า (A.)	43.5/87
ความถี่ (Hz)	50
ความเร็วรอบ (rev/min)	1500
$\cos \phi$	1.0
Voltage (V.)	80
$I_{excite}$ (A.)	4.1 ; excite current
Insulation Class	B
RAT.	S1
Phase	1

### 5.1.3 มู่เล่ และสายพาน

จากรูป 5-2 ทำการติดตั้ง มู่เล่ ที่ล้อช่วยแรงของเครื่องยนต์และติดตั้ง มู่เล่ อีกตัวหนึ่งที่ปลายเพลาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วใช้สายพานชนิด V เป็นตัวส่งถ่ายกำลังระหว่าง มู่เล่ ทั้งสอง และเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 1,500 รอบต่อนาที แต่การทดสอบสมรรถนะและทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์นั้นต้องทดสอบทั้งหมด 6 ความเร็วรอบด้วยกัน ได้แก่ ที่ 1,000 1,200 1,500 1,800 2,000 และที่ 2,400 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนอัตราทดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ให้เหมาะสมกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ มู่เล่ ตามสัดส่วนของความเร็วรอบจากเครื่องยนต์ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 5-3



รูปที่ 5-2 แสดงการติดตั้งเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 5-3 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ มู่เล่ ตามอัตราทดรอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ค่าต่างๆ

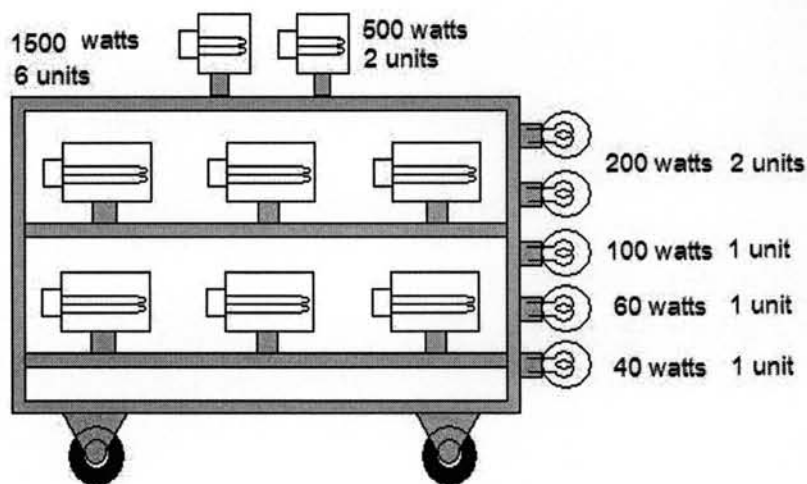
speed (rev/min)		Pulley Diameter (in.)	
Engine	Generator	$D_E$	$D_G$
1000	1500	6	4
1200	1500	5	4
1500	1500	4	4
1800	1500	5	6
2000	1500	6	8
2400	1500	5	8

( $D_E$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของมู่เล่เครื่องยนต์,  $D_G$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของมู่เล่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

### 5.1.4 แผงหลอดไฟ

ในงานวิจัยนี้จะใช้หลอดไฟฟ้าซึ่งจัดเรียงเป็นแผง เป็นภาระให้กับเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 5-3 ซึ่งเป็นหลอดไฟฟ้าชนิดความถี่ 50 Hz. ความต่างศักย์ 220 โวลท์ รวมทั้งสิ้นจำนวน 12 หลอด รายละเอียดของหลอดไฟฟ้ามี่ดังนี้

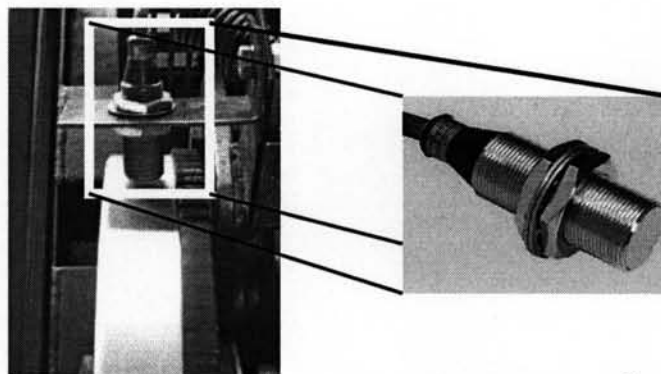
หลอดไฟฟ้าแบบฮาโลเจน	ขนาด 1500 วัตต์ (50 Hz)	จำนวน 6 หลอด
หลอดไฟฟ้าแบบฮาโลเจน	ขนาด 500 วัตต์ (50 Hz)	จำนวน 2 หลอด
หลอดไฟฟ้าแบบไส้	ขนาด 200 วัตต์	จำนวน 2 หลอด
หลอดไฟฟ้าแบบไส้	ขนาด 100 วัตต์	จำนวน 1 หลอด
หลอดไฟฟ้าแบบไส้	ขนาด 40 วัตต์	จำนวน 1 หลอด



รูปที่ 5-3 แสดงแผงหลอดไฟที่ใช้เป็นภาระของเครื่องยนต์

### 5.1.5 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

การวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ใช้อุปกรณ์การวัดแบบ Aluminum Detecting Proximity Sensor ยี่ห้อ Omron รุ่น E2EY ดังแสดงในรูปที่ 5-4 ซึ่งติดตั้งที่ตำแหน่งล้อช่วยแรง โดยสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับวัดความเร็วรอบ จะส่งไปยังตู้แปลงสัญญาณ (Data Logger) และส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูล



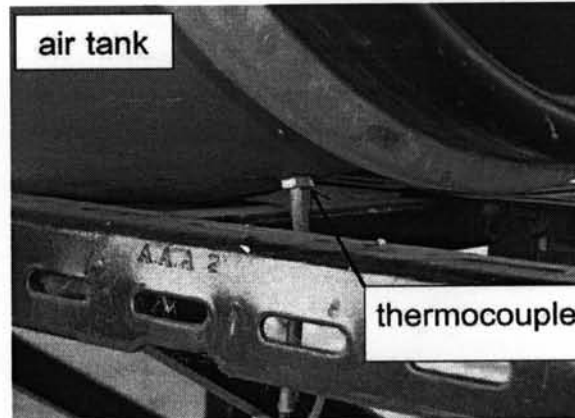
รูปที่ 5-4 แสดงตัวตรวจจับวัดความเร็วรอบ และตำแหน่งการติดตั้ง

### 5.1.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิ ใช้ เทอร์โมคัปเปิล ชนิด type K (Chromel-Alumel, CA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มม. โดยสัญญาณที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล จะส่งไปยังตู้แปลงสัญญาณ (Data Logger) และส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูล

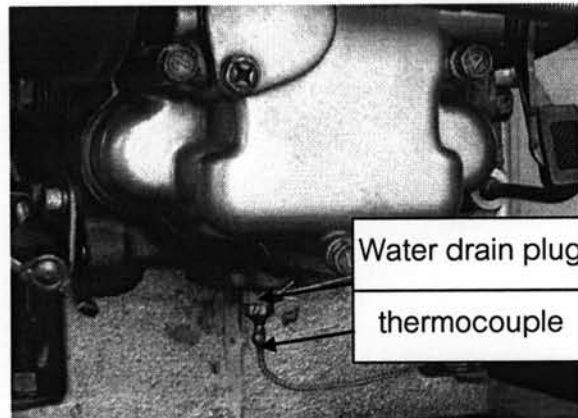
ตัวแปรอุณหภูมิการทำงานที่ทำการวัดมีดังนี้

ก. อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าท่อไอดีก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ทำการติดตั้งไว้ภายในถังพักอากาศ ช่วงระหว่าง orifice plate กับกรองอากาศ ดังรูป 5-5



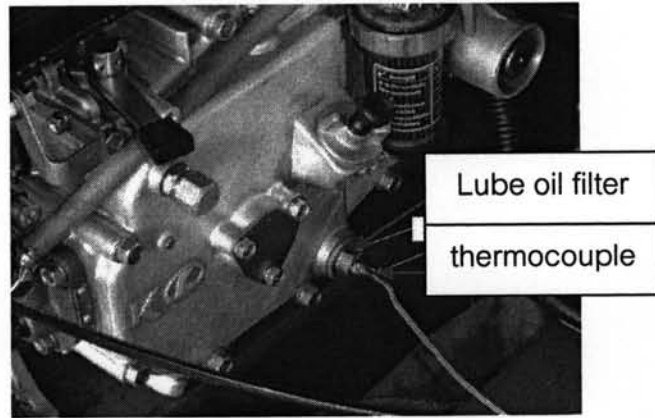
รูปที่ 5-5 แสดงจุดที่ติดตั้งหัววัดเทอร์โมคัปเปิลในถังพักอากาศ

ข. อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ทำการติดตั้งไว้ที่ปลั๊กถ่ายน้ำหล่อเย็นที่อยู่ด้านล่างของฝาสูบ ดังรูป 5-6



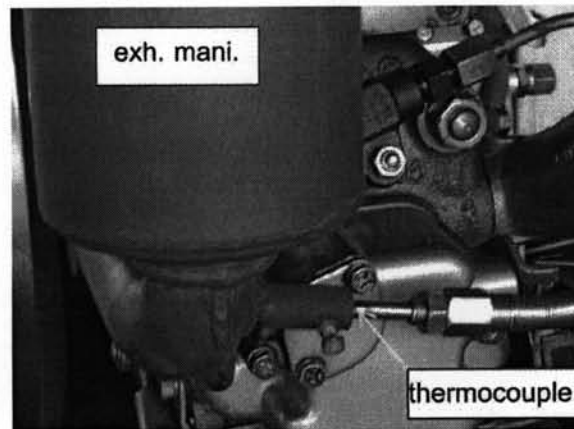
รูปที่ 5-6 แสดงการติดตั้งหัววัดเทอร์โมคัปเปิลที่ปลั๊กถ่ายน้ำหล่อเย็นบริเวณด้านล่างของฝาสูบ

ค. อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น ทำการติดตั้งหัววัดเทอร์โมคัปเปิลไว้ในตัวกรองน้ำมันหล่อลื่น โดยหัววัดแช่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นตลอดเวลา และไม่สัมผัสกับผิวของเสื้อสูบที่เป็นอ่างน้ำมันหล่อลื่น ดังรูปที่ 5-7



รูปที่ 5-7 แสดงการติดตั้งหัววัดของเทอร์โมคัปเปิลที่กรองน้ำมันหล่อลื่น

ง. อุณหภูมิไอเสีย ทำการติดตั้งหัววัดไว้ที่ท่อไอเสียหลังจากออกจากห้องเผาไหม้ประมาณ 10 เซนติเมตร ดังรูป 5-8



รูปที่ 5-8 แสดงหัววัดของเทอร์โมคัปเปิลที่ท่อไอเสีย

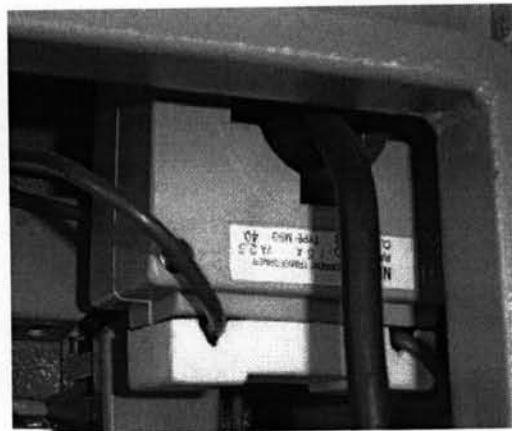
#### 5.1.7 ตู้อแปลงสัญญาณ (Data Logger)

ตู้อแปลงสัญญาณ มีหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ความเร็วรอบ ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ และกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วแปลงสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณดิจิทัล และส่งต่อไปยัง คอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูลที่ได้ ดังรูปที่ 5-9 โดยตู้อแปลงสัญญาณมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้



รูปที่ 5-9 แสดงตู้แปลงสัญญาณ (Data Logger)

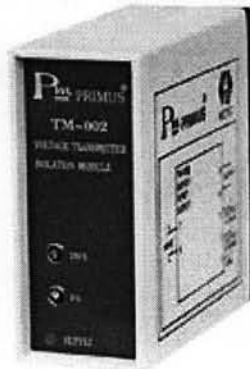
ก. อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Transformer) ยี่ห้อ Nitech Class 3 ดังรูปที่ 5-10 มีหน้าที่รับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ ในช่วง 0-50Aac ไปเป็น 0-5Aac สำหรับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ Current Transmitter



รูปที่ 5-10 แสดงอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ Nitech

ข. อุปกรณ์แปลงสัญญาณเป็นสัญญาณอนาล็อก (Transmitter) ยี่ห้อ Primus ดังรูปที่ 5-11 มีหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์การวัดต่างๆ แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก จำนวน 8 ตัว ประกอบด้วย





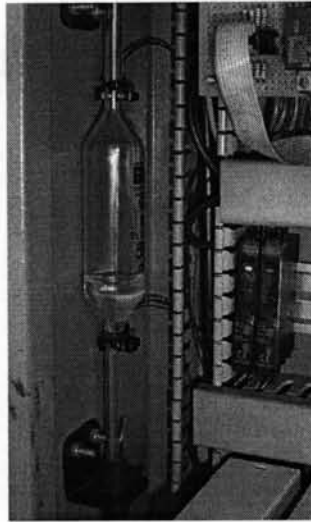
รูปที่ 5-11 แสดงอุปกรณ์แปลงสัญญาณเป็นสัญญาณอนาลอก Primus

- Current Transmitter รุ่น TM-001 จำนวน 1 ตัว มีหน้าที่รับสัญญาณกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจากอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ในช่วง 0-5 Aac แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก 0-5 Vdc
- Voltage Transmitter รุ่น TM-002 จำนวน 1 ตัว มีหน้าที่รับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วง 0-250 Vac แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก 0-5 Vdc
- Thermocouple Transmitter รุ่น TM-004 จำนวน 5 ตัว มีหน้าที่รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก 0-5 Vdc จำนวน 5 ตัว
- Tachometer Transmitter รุ่น TM-005 จำนวน 1 ตัว มีหน้าที่รับสัญญาณจากตัวตรวจจับวัดความเร็วรอบในช่วง 0-3000 รอบต่อนาที แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก 0-5 Vdc

ค. ไอซี ยี่ห้อ Philips เบอร์ PCF8591P มีหน้าที่รับสัญญาณ อนาลอก จากอุปกรณ์แปลงสัญญาณPrimus แล้วแปลงเป็นสัญญาณ ดิจิตอล เพื่อส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์

ง. อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 5-12 มีหน้าที่ตรวจวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ด้วยการจับเวลาของการใช้เชื้อเพลิงที่ปริมาตรคงที่ เพื่อส่งข้อมูลไปทำการประเมินผลที่คอมพิวเตอร์ ประกอบด้วย หลอดแก้วปริมาตร 50 มิลลิลิตร และเซนเซอร์ตรวจจับระดับของเหลวชนิด Optical ยี่ห้อ Omron รุ่น E3X-DA11 ร่วมกับแอมพลิฟายเออร์ โดยค่าที่ได้ส่งต่อไปยัง คอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูล





รูปที่ 5-12 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

ซึ่งหลักการทำงาน คือ จากรูปที่ 5-12 เมื่อระดับน้ำมันเคลื่อนที่ลดลงมาถึงเซนเซอร์ตัวบน (a) นาฬิกาจับเวลาจะเริ่มทำงาน เมื่อระดับน้ำมันลดลงมาถึงเซนเซอร์ตัวล่าง (b) นาฬิกาจะหยุด แล้ววงจรอิเล็กทรอนิกส์จะสั่งให้โซลินอยด์วาล์วเปิดหลังจากระดับน้ำมันผ่านเซนเซอร์ตัวล่างไปแล้ว 0.1 วินาที น้ำมันจากถังก็จะไหลกลับเข้าไปในหลอดวัดอีกโดยอัตโนมัติ ซึ่งโซลินอยด์วาล์วดังกล่าวจะปิดกั้นการไหลของเชื้อเพลิงขณะทำการวัดไม่ให้ไหลเข้าระบบ โดยช่วงเวลาที่วัดได้นำมาใช้ในการคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรดังสมการที่ 5.1

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (5.1)$$

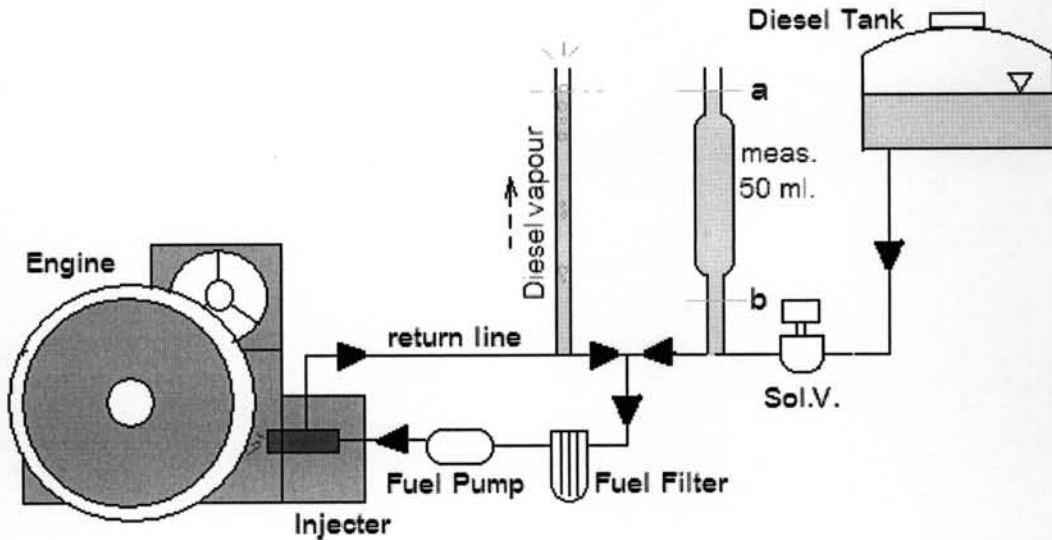
โดยที่  $\dot{V}$  คือ อัตราการไหลโดยปริมาตร (ml/s)  
 $V$  คือ ปริมาตรที่ใช้วัด (ml)  
 $t$  คือ ช่วงเวลาที่นาฬิกาจับเวลาได้ (s)

โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและบันทึกค่าไว้ในฐานข้อมูลของโปรแกรม พร้อมแสดงค่าที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ ในการวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงนี้มีการต่อเส้นทางเดินของน้ำมัน ดังแผนผังรูปที่ 5-13 ทั้งนี้เพื่อกำจัดความผิดพลาดจากการวัดที่อาจเกิดขึ้นจากน้ำมันที่ไหลกลับจากหัวฉีด (return line) และเพื่อกำจัดความผิดพลาดจากการวัดที่อาจเกิดจากไอน้ำมันในระบบทางเดินน้ำมันด้วย ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจึงทำการติดตั้งบริเวณหลังได้กรองน้ำมัน

อัตราการสิ้นเปลืองเชิงมวลของน้ำมันดีเซลคำนวณได้จากสมการที่ 6.2

$$m_f = \frac{\rho_f V}{t} \quad (5.2)$$

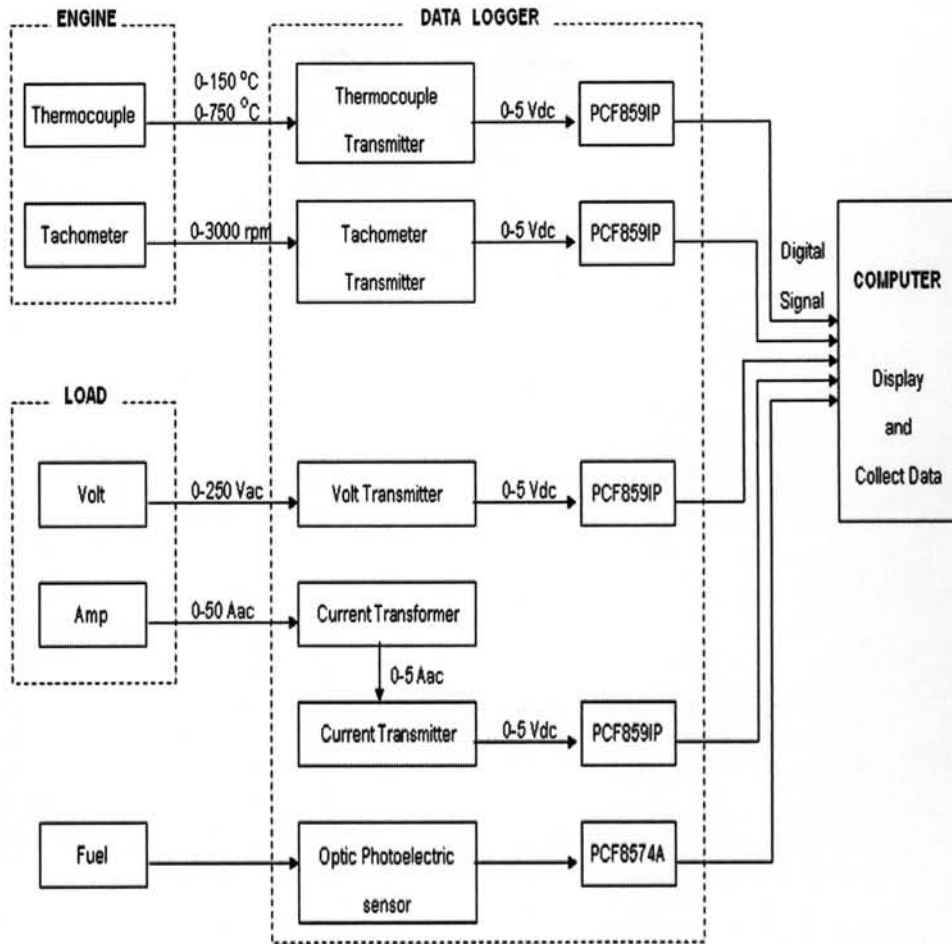
โดยที่  $m_f$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันดีเซล (kg/s)  
 $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซล (kg/m<sup>3</sup>)



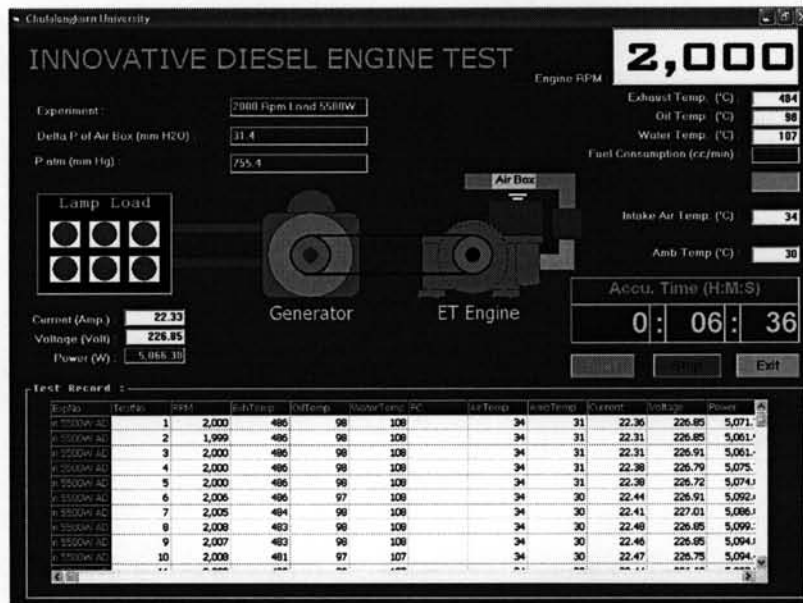
รูปที่ 5-13 แสดงแผนผังการต่อระบบน้ำมันดีเซลและอุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

หลักการทำงานของการวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เมื่อกดปุ่ม start ในรูปที่ 5-15 solenoid valve จะปิดทางเดินน้ำมันจากถังน้ำมัน ปริมาณน้ำมันจะลดลงจาก a ถึง b ในปริมาณ 50 ml ซึ่งที่ตำแหน่ง a และ b จะใช้ optical sensor เป็นอุปกรณ์ส่งสัญญาณ เมื่อน้ำมันผ่านจุด a โปรแกรมจะเริ่มนับเวลาจนกระทั่งน้ำมันผ่านจุด b โปรแกรมจะหยุดเวลา จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงตามสมการ 5-2 แล้วแสดงผล เมื่อปริมาณน้ำมันผ่านจุด b optical sensor จะส่งสัญญาณไปยัง Solenoid valve เพื่อเปิดทางเดินน้ำมันจากถังจนปริมาณน้ำมันผ่านจุด a แล้ว Solenoid valve จะปิดทางเดินน้ำมัน โดยการทำงานของ Solenoid valve จะทำงานเป็นระบบดังกล่าวข้างต้นจนกระทั่งกดปุ่ม stop ในรูปที่ 5-15 Solenoid valve ก็จะเปิดทางเดินน้ำมันจากถังน้ำมัน เพื่อให้ น้ำมันผ่านไปยังเครื่องยนต์

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น เป็นอุปกรณ์หลักที่อยู่ในตู้แปลงสัญญาณ(Data Logger) โดยจะแสดงหลักการทำงานเป็นแผนผังการทำงาน (Flow Chart) ดังรูปที่ 5-14 จากนั้นสัญญาณที่ออกจากตู้แปลงสัญญาณจะส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูล โดยใช้โปรแกรม Alternative Diesel Engine Test ซึ่งเขียนด้วยภาษา Visual Basic ดังรูปที่ 5-15



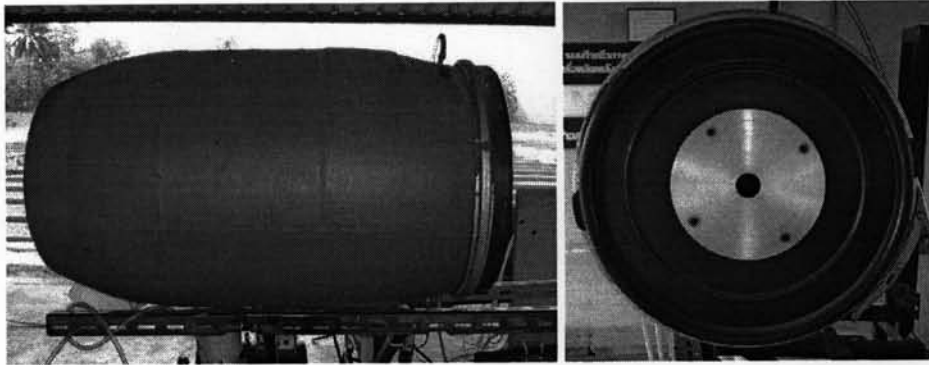
รูปที่ 5-14 แสดงแผนผัง (Flow Chart) การทำงานของระบบการวัด ข่าน และบันทึกข้อมูลการวัด



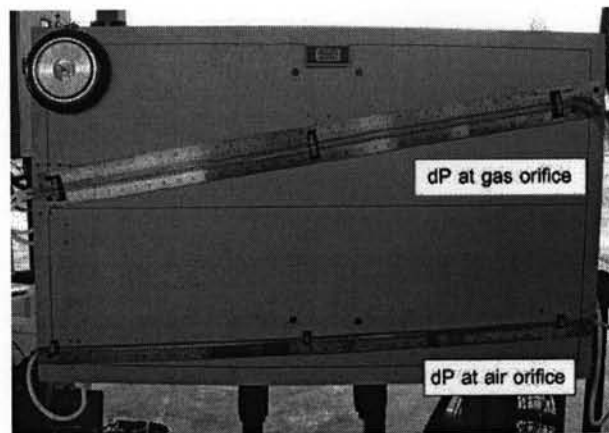
รูปที่ 5-15 แสดงหน้าจอแสดงผลจากการวัดโดยโปรแกรม Innovative Diesel Engine Test

### 5.1.8 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์ ทำการวัดด้วย orifice ซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าถังพักอากาศ ดังรูปที่ 5-16 โดยถังพักอากาศจะช่วยลดการกระเพื่อมของอากาศที่ไหลผ่าน orifice เนื่องจากจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ และวัดค่าความดันตกคร่อม Orifice plate เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้ inclined manometer ดังรูปที่ 5-17 โดยรายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข



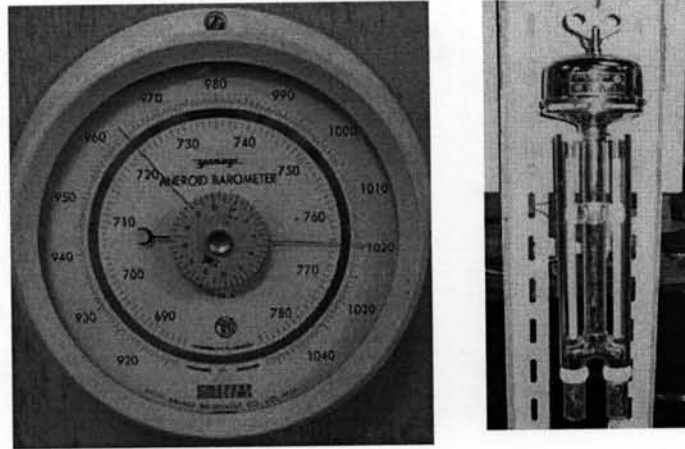
รูปที่ 5-16 แสดงถังพักอากาศและการติดตั้ง orifice plate



รูปที่ 5-17 แสดง inclined manometer

### 5.1.9 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (Ambient Condition)

ระหว่างการทดสอบสมรรถนะได้ทำการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งของบรรยากาศ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งแบบปรอทตามลำดับ ส่วนความดันบรรยากาศ วัดโดยใช้บารอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5-18



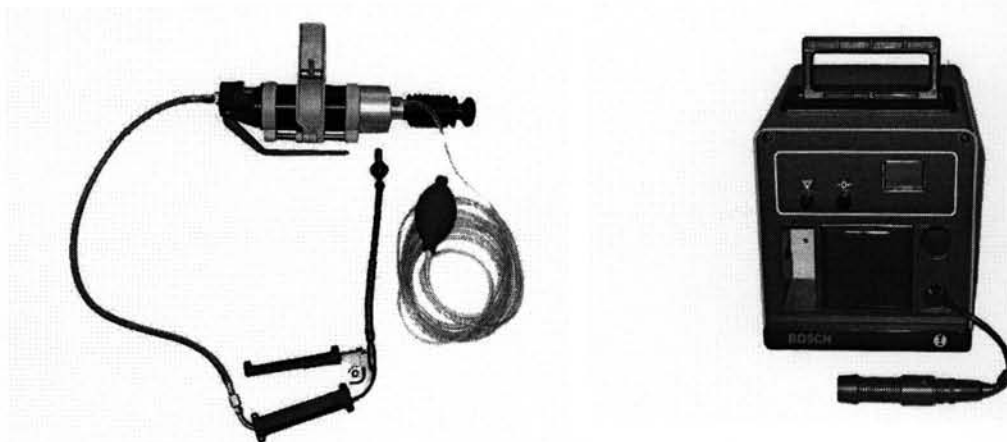
รูปที่ 5-18 แสดงภาพบารอมิเตอร์ (ซ้าย) และเทอร์โมมิเตอร์ (ขวา)

#### 5.1.10 อุปกรณ์วัดค่าควันดำ (Smoke Meter)

เครื่องมือวัดค่าควันดำเป็นแบบกระดาษกรอง ยี่ห้อ BOSCH ดังแสดงในรูปที่ 5-19 ประกอบด้วย

ก. บั๊มดูดไอเสีย รุ่น ETD 020.00 เป็นเครื่องมือเก็บตัวอย่างค่าควันดำจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ภายในตัวบั๊มจะประกอบด้วย

- ครอบอกบั๊ม ภายในมีลูกสูบที่มีปลายช่องสำหรับใส่กระดาษกรอง
- สปริงคั่นชักรัดจากลูกสูบ (ตัวสปริงถูกหุ้มด้วยปลอกยาง)
- ลูกยางบีบ มีท่อต่อลมเข้ากับตัวลอคสปริง ที่หัวครอบอกบั๊ม
- หัวดูดไอเสีย (Exhaust - Sample Pickup) ประกอบด้วยอุปกรณ์ยึดติดกับท่อไอเสีย และท่อลมสำหรับแก๊สไอเสียผ่านเข้าครอบอกสูบ



รูปที่ 5-19 ชุดเครื่องมือวัดค่าควันดำ ภาพซ้าย แสดงภาพบั๊มดูดไอเสีย รุ่น ETD 020.00

ภาพขวา แสดงภาพ เครื่องอ่านค่าควันดำ รุ่น ETD 020.50

ข. เครื่องอ่านค่าควันท้า รุ่น ETD 020.50 เป็นเครื่องอ่านค่าความเข้มของเขม่าดำบนกระดาษกรอง แสดงค่าด้วยตัวเลขดิจิทัลเรื่องแสง มีสเกลอยู่ระหว่าง 0 – 10 ความละเอียด 0.1 เมื่อตัวเลขแสดงค่า 0 มีความหมายว่าผิววัตถุที่ทดสอบนั้นขาวบริสุทธิ์ ถ้าตัวเลขแสดงค่า 10 หมายความว่าผิววัตถุที่ทดสอบนั้น ดำสนิท หรือมีความดำ ร้อยละ 100 ในหัวอ่านค่าควันท้า ภายในจะประกอบด้วย Photo Element รูปวงแหวนตรงกลางมีหลอดไฟ และมีสายสัญญาณส่งเข้าเครื่องอ่านค่า หลักการทำงานคือเมื่อกดสวิทช์อ่านค่า หลอดไฟจะติด แสงที่พุ่งออกไปเมื่อกระทบกับผิววัตถุ (กระดาษกรอง) จะมีการสะท้อนกลับ Photo Element จะรับแสงสะท้อนนั้นแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านตามสายไฟฟ้าไปยังตัวอ่านค่าควันท้าและแสดงค่าออกมาเป็นตัวเลขเรื่องแสง ในกรณีที่กระดาษกรองขาวบริสุทธิ์ แสงจะสะท้อนกลับมาหมด Photo Element จะส่งสัญญาณเป็นกระแสไฟเต็มที ตัวเลขจะแสดงค่า 0 ถ้ากระดาษกรองดำสนิท จะดูดกลืนแสงไว้ทั้งหมด ไม่มีการสะท้อนกลับ จึงไม่มีสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังเครื่องวัด ตัวเลขจะแสดงค่า 10 ในการวัดค่าจากกระดาษกรองจะทำการวัด 5 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่ง บน, กลาง, ล่าง, ซ้าย และขวา ของกระดาษ จากนั้นจะหาค่าเฉลี่ยจาก 5 จุดที่วัดค่า อีกทั้งในการวัดค่าแต่ละจุดทดสอบ จะทำการวัดค่าควันท้าถึง 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยต่อหนึ่งจุดทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

## 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวัดความดันห้องเผาไหม้

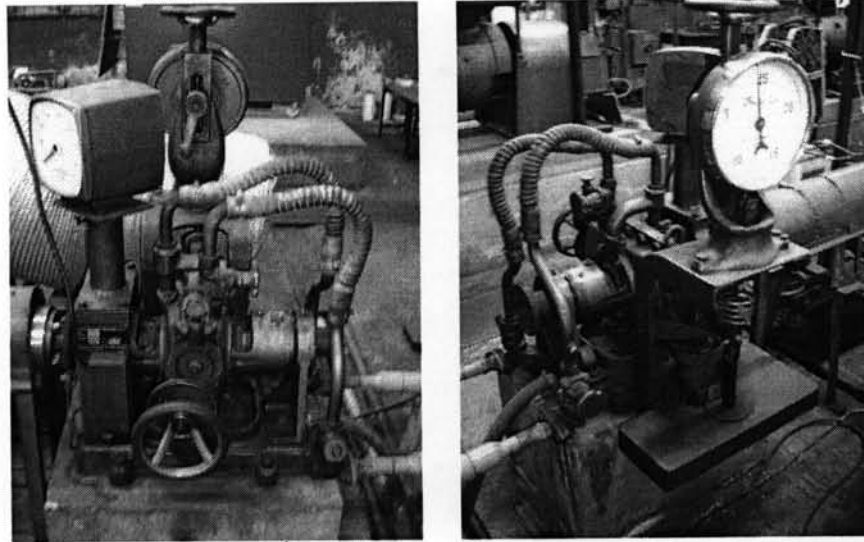
### 5.2.1 ไดนาโมมิเตอร์

ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบไฮดรอลิค(Hydraulic Dynamometer) ใช้น้ำในการเบรกการหมุนของเพลา (Water Brake) รูปที่ 5-20 แสดงภาพไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ข้อมูลเกี่ยวกับไดนาโมมิเตอร์แสดงดังรายการต่อไปนี้

ตารางที่ 5-4 แสดงข้อมูลไดนาโมมิเตอร์

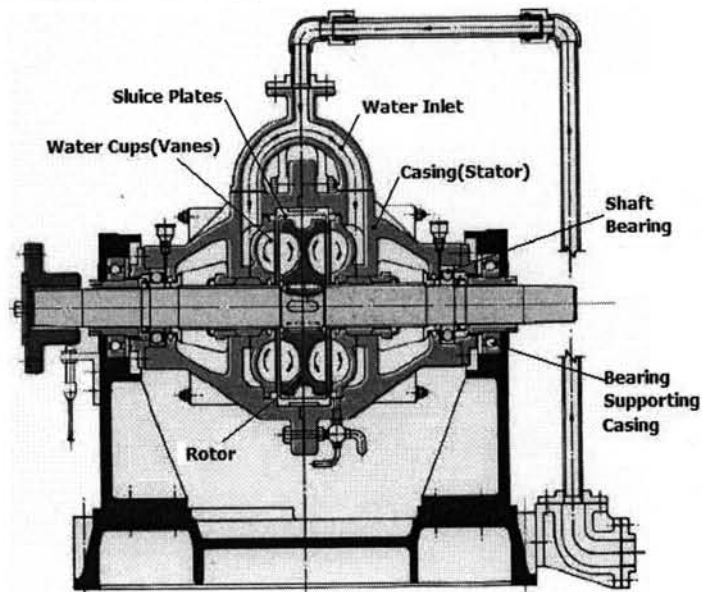
ประเภทของไดนาโมมิเตอร์	Hydraulic Dynamometer
ผู้ผลิต	Redman Heenan International Company, England
รุ่น	Froude Hydraulic Dynamometer (DPX2)
Resolution	0.1 kg
ความยาวแขนสมดุล( $L_B$ )	0.03525 m
กำลังสูงสุดที่สามารถรับได้	150/7500 CV/rpm, (1 CV $\cong$ 0.986 HP)





รูปที่ 5-20 แสดงภาพไดนาโมมิเตอร์

องค์ประกอบของไดนาโมมิเตอร์



แสดงภาพตัดขวางของไดนาโมมิเตอร์แบบ Hydraulic

รูปที่ 5-21 แสดงภาพตัดขวางภายในของไดนาโมมิเตอร์แบบไฮดรอลิก

หลักการทำงานของไดนาโมมิเตอร์

Froude Dynamometer ประกอบด้วยเพลลาซึ่งที่ปลายด้านหนึ่งมีหน้าแปลน สำหรับยึดต่อกับหน้าแปลนเพลลาที่ต่อมาจากเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ ภายใน ไดนาโมมิเตอร์มีส่วนที่หมุนไปพร้อมกับเพลลาเรียกว่าโรเตอร์(rotor) ดูรูป 5-21 โดยที่โรเตอร์เป็น ใบพัด(vanes) มีหลุมลักษณะคล้ายถ้วย(water cups vans)หลายใบเรียงตัวตามแนวรัศมีรอบ ใบพัดทั้งสองด้าน (ดูรูปประกอบ) ทั้งเพลลาและโรเตอร์อยู่ในตัวเรือน(Casing) ที่ตัวเรือนด้านในจะมีใบพัดเหมือนกับที่โรเตอร์คือมีหลุมคล้ายถ้วยเรียงตัวตามแนวรัศมีของใบพัด อยู่ในลักษณะ



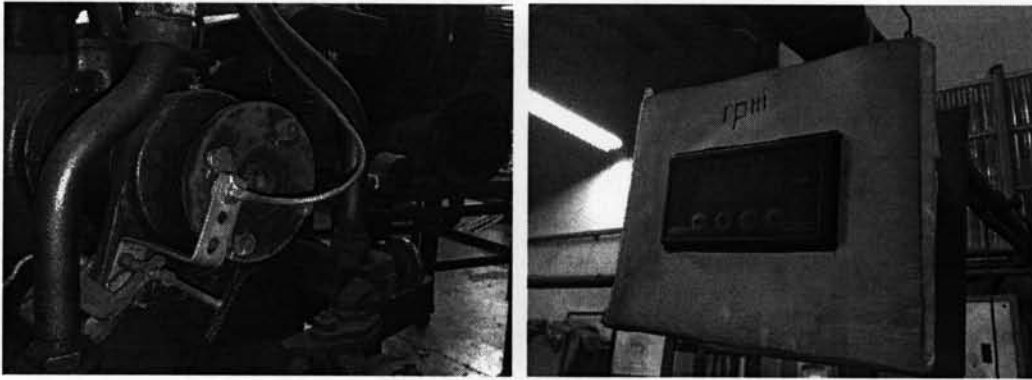
ประกบเข้ากับใบพัดของโรเตอร์ ตัวเรื่อนนี้มีแบริ่งรองรับอยู่บนแท่นของไดนาโมมิเตอร์ ดังนั้นตัวเรื่อนจึงสามารถหมุนแกว่งได้อย่างอิสระจากเพลลาที่หมุนภายในตัวเรื่อน

เมื่อโรเตอร์หมุน น้ำที่อยู่ในถ้วยจะถูกเหวี่ยงออกจากโรเตอร์ น้ำที่ถูกเหวี่ยงออกนี้จะพุ่งไปสู่ถ้วยที่อยู่ฝั่งตัวเรื่อน ถ้วยในใบพัดฝั่งตัวเรื่อนนี้เองก็จะสะท้อนน้ำที่พุ่งเข้ามาให้พุ่งกลับสู่ถ้วยฝั่งโรเตอร์ จึงเป็นการต้านหรือพยายามเบรกการหมุนของโรเตอร์และเพลลา งานที่เครื่องยนต์กระทำต่อน้ำจะทำให้เรามีอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าจะลอยอยู่ด้านบนภายในตัวเรื่อนและไหลออกไปทางท่อน้ำที่อยู่ด้านบน และน้ำเย็นจะไหลเข้ามาแทนที่โดยการทำงานของปั้มน้ำ ดังนั้นสามารถปรับภาวะที่กระทำต่อเครื่องยนต์ได้ด้วยการปรับปริมาณน้ำที่อยู่ในตัวเรื่อน โดยการหมุนปรับที่วาล์วน้ำขาออกจากตัวเรื่อน กล่าวคือการหรือวาล์วน้ำขาออกเป็นการเพิ่มภาวะให้กับเครื่องยนต์ (ส่วนที่ขาเข้านั้นต้องเปิดสุดไว้เสมอ) นอกจากนี้การปรับภาวะยังสามารถปรับได้จากการปรับขนาดประตูน้ำ (Sluice Plates) ระหว่างใบพัดฝั่งโรเตอร์และใบพัดฝั่งตัวเรื่อน ซึ่งมีพวงมาลัยสำหรับควบคุมประตูน้ำที่ด้านข้างตัวเรื่อน (การเปิดประตูน้ำกว้างมากขึ้นเป็นการเพิ่มภาวะให้กับเครื่องยนต์)

เมื่อเครื่องยนต์ทำงาน โรเตอร์ซึ่งยึดติดอยู่กับเพลลาจะพยายามหมุนพาให้ตัวเรื่อน (ซึ่งเป็นอิสระจากเพลลา) หมุนตามไปด้วยโดยมีน้ำเป็นตัวกลาง ทำให้ตัวเรื่อนแกว่งไปในทิศเดียวกับทิศการหมุนของเพลลา สามารถวัดแรงบิดที่เพลลาพยายามกระทำนี้ได้ด้วยการหมุนพวงมาลัยปรับตำแหน่งตัวเรื่อนให้กลับมาอยู่ในภาวะสมดุล สังเกตจุดสมดุลได้จากหมุด (pointer) ที่ตัวเรื่อนและที่แท่นไดนาโมมิเตอร์ต้องตรงกันพอดี การปรับสมดุลของตัวเรื่อนนี้ทำให้เราอ่านค่าน้ำหนักหรือแรงที่สปริงซึ่งติดกับแขนสมดุล (balance arm) ของตัวเรื่อนได้รับ จากการนำค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากหน้าปัดของไดนาโมมิเตอร์คูณกับระยะแขนสมดุลของไดนาโมมิเตอร์ จะได้ค่าแรงบิดที่ด้านการหมุนของเพลลา ซึ่งเท่ากับแรงบิดที่ได้รับจากเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์นั่นเอง

### 5.2.2 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วรอบในการทดลองนี้ คือ Proximity ชนิด inductive วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และใช้พัลส์มิเตอร์ (pulse meter) แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ โดยยึดตัว proximity ไว้ที่ฐานของไดนาโมมิเตอร์ และวัดความเร็วรอบจากการหมุนของหน้าแปลน (flange) เพลลาไดนาโมมิเตอร์ฝั่งตรงข้ามกับเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 5-22 และข้อมูลทางเทคนิคของ proximity ที่ใช้ในการวัดความเร็วรอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-5

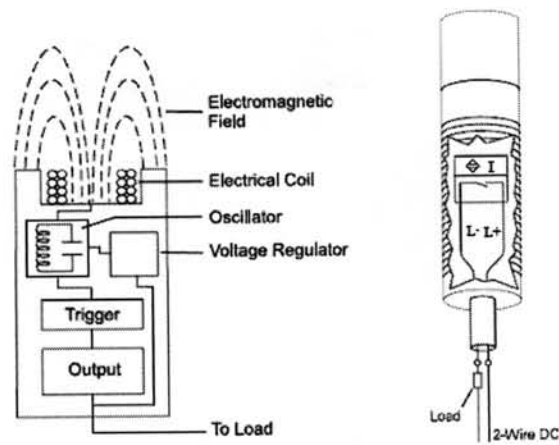


รูปที่ 5-22 แสดง Proximity (ซ้าย) และ Pulse meter (ขวา)

ตารางที่ 5-5 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของ proximity ที่ใช้วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์

ยี่ห้อ, รุ่น	OMRON, E2E-X2D1-N
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	8 mm (M8)
Type	Shielded
Sensing distance	2 mm $\pm$ 10%
Operating voltage	12 to 24 VDC
Leakage current	0.8 mA max.
Response frequency	1.5 kHz (1,500 pulse/sec)
Operation	Load ON
Indicator	Operation set indicator (green LED)
Ambient temp.	-25 °C to 70 °C
Vibration resistance	10 to 55 Hz
Weight	Approx. 45 g

สำหรับหลักการการทำงานของชุดอุปกรณ์วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ อธิบายได้ว่า proximity เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส โดย proximity แบบ inductive นั้นอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic field) ในการตรวจจับวัตถุเป้าหมายที่เป็นโลหะ (metal target) ที่ผ่านเข้ามาในระยะอิทธิพล (sensing distance) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากตัว proximity จึงไม่มีการสัมผัสกับวัตถุเป้าหมายนั้น ซึ่งภายในตัวเรือนของ proximity ประกอบด้วย ขดลวดพันรอบแกนแม่เหล็ก (coil), ออสซิลเลเตอร์ (oscillator), วงจรตรวจจับ (trigger circuit) และวงจรเอาต์พุต (output circuit) ดังรูปที่ 5-23



รูปที่ 5-23 แสดงส่วนประกอบภายในตัวเรือนของ proximity แบบ inductive

โดยออสซิลเลเตอร์ใน Proximity อาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกมาสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแผ่ออกทางผิวหน้าของเซ็นเซอร์ (sensor face) ผ่านขดลวด เมื่อมีวัตถุที่เป็นโลหะเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในระยะอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วัตถุที่เป็นโลหะดังกล่าวจะดูดซับพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเกิดการเหนี่ยวนำ (inductive) ได้ กระแสไฟฟ้าไหลวน (eddy currents) ภายในตัวของวัตถุที่เป็นโลหะดังกล่าว ทำให้ค่าแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง ยิ่งวัตถุที่เป็นโลหะดังกล่าวเข้าใกล้มากก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนมากขึ้น เป็นการสูญเสียพลังงานของออสซิลเลเตอร์มากขึ้น เมื่อค่าของแอมพลิจูดลดลงถึงค่าที่กำหนด วงจรตรวจจับและวงจรเอาต์พุตจะตรวจจับค่าแอมพลิจูดและส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดด้วยการเปิดหรือปิด (On or Off) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าเซ็นเซอร์เป็นแบบ normal close (NC) หรือแบบ normal open (NO) เมื่อวัตถุที่เป็นโลหะเคลื่อนที่ห่างออกไปจากผิวหน้าเซ็นเซอร์ ขนาดของแอมพลิจูดของออสซิลเลเตอร์จะกลับมาเพิ่มขึ้น วงจรตรวจจับและวงจรเอาต์พุตจะตรวจจับขนาดของแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้น และส่งสัญญาณด้วยการเปิดหรือปิด (On or off) วงจรเมื่อค่าแอมพลิจูดกลับมาที่ภาวะปกติ โดยวงจรเอาต์พุตจะทำการส่งสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นทุกครั้งไปยังพัลส์มิเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ในการนับจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นใน 1 วินาทีและแสดงออกมาเป็นความเร็วรอบในหน่วยรอบต่อนาที โดยผ่านการคำนวณ ดังสมการ 5.3

$$rpm = \frac{(pulse / sec) \times 60 sec}{(tooth no./ rev.)} \quad (5.3)$$

ตารางที่ 5-6 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของพัลส์มิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงผลความเร็วรอบเครื่องยนต์

ยี่ห้อ, รุ่น	DIGICON, PM-05
Power supply	100-240 VAC 50/60 Hz
Power for external sensor	12 VDC $\pm$ 10%, 80 mA
Measuring accuracy ( $23 \pm 5^{\circ}$ C)	F.S. $\pm$ 0.05% rdg $\pm$ 1 Digit.
Measuring range	0.0005 kHz to 50 kHz
Input signal	Max. 50 kHz(ON/OFF pulse) (ON voltage : 4.5-24V, OFF voltage : 0-1.0V)
Max. indication	5 digit (19999 to 99999)
Display accuracy(update output cycle)	0.05/0.5/1/2/4/8 sec
Prescale function	Direct input method
Hysterisis	0 to 9999
Ambient temp.	-10 to 50 $^{\circ}$ C
Weight	Approx. 230 g

### 5.2.3 Piezoelectric pressure transducer

สำหรับการวัดและเก็บค่าความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดใช้ Piezoelectric pressure transducer ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกควอทซ์ ซึ่งจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกมาเมื่อมีแรงกระทำบนผลึก โดยประจุที่จ่ายออกมาจะมีค่าแปรตามแรงกระทำนั้นในการวัดความดันในห้องเผาไหม้จะใช้ pressure transducer ติดที่ห้องเผาไหม้ล่วงหน้า สำหรับการทดสอบนี้ใช้ pressure transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P ดังรูปที่ 5-24 ติดตั้งที่บนฝาสูบของเครื่องยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5-26 ซึ่งมีรายละเอียด ดังตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-7 แสดงคุณสมบัติของ pressure transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P

ช่วงการวัดตั้งแต่	0 ถึง 20	Mpa
Overload	25	Mpa
Sensitivity	150	pC/MPa
Linearity	น้อยกว่า $\pm 0.3$	% FSO
Acceleration Sensitivity	น้อยกว่า 0.001	bar/ g
Shock Resistance	มากกว่า 2000	g

ตารางที่ 5-7 แสดงคุณสมบัติของ pressure transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P (ต่อ)

ช่วงอุณหภูมิใช้งานได้ถึง	400	°C
Insulation Resistance ที่ 20°C	มากกว่า 1013	$\Omega$
ค่า Capacitance	7	pF
Thermal Sensitivity Shift		
ช่วง 20 ถึง 400°C	น้อยกว่า $\pm 2\%$	
ช่วง 200 ถึง 300°C	น้อยกว่า $\pm 0.5\%$	



รูปที่ 5-24 แสดงภาพของ Pressure transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้

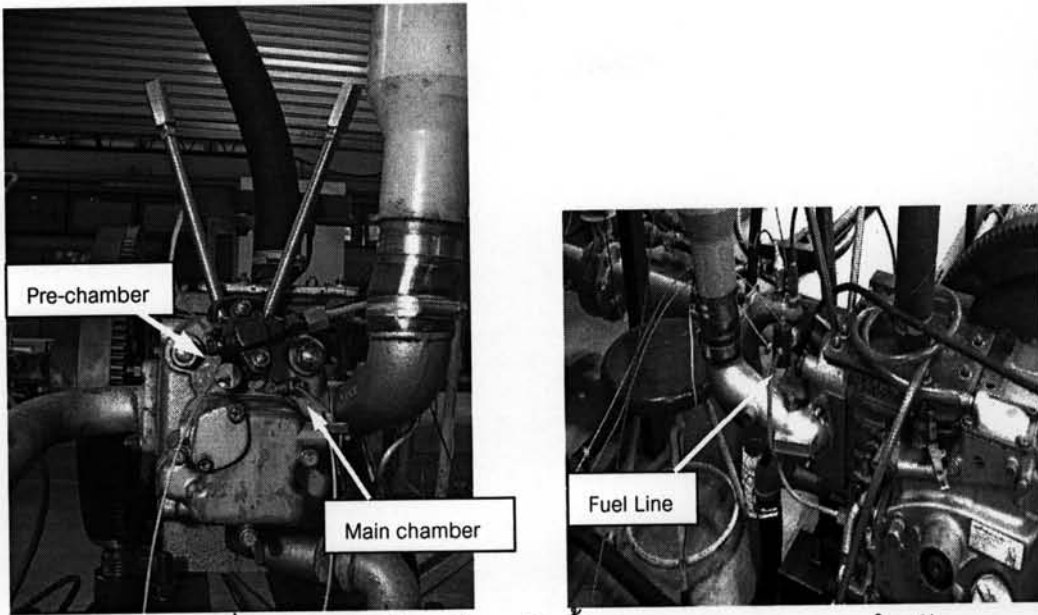
รูปที่ 5-25 แสดงภาพของ Pressure transducer สำหรับวัดความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด

**ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด (Fuel line pressure)**

ในการวัดความดันที่ท่อจ่ายเชื้อเพลิงจะใช้ Pressure transducer ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 607C1 ดังรูปที่ 5-25 pressure transducer จะติดตั้งบนท่อจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงช่วงระหว่างปั้มน้ำมันเชื้อเพลิงกับหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 5-26 ซึ่งมีรายละเอียด ดังตารางที่ 5-8

ตารางที่ 5-8 แสดงคุณสมบัติของ pressure transducer ยี่ห้อ Kistler รุ่น 607C1

ช่วงการใช้งาน	0 ถึง 482,633	kPa
ความดันที่วัดได้สูงสุด	698,476	kPa
ค่า sensitivity	-0.0174	pC/kPa
อุณหภูมิใช้อยู่ในช่วง	-196 ถึง 260	°C
ทนอุณหภูมิ intermittent gas temperature	1650	°C
ค่า temperature coefficient of sensitivity	0.02	%/ °C



รูปที่ 5-26 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Pressure transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด

#### 5.2.4 อุปกรณ์เก็บข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้

เครื่อง DEWETRON Book เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้ เครื่อง DEWETRON Book นี้วิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม Combustion Analyzer version 6 ทำให้สามารถเก็บข้อมูลความดันแบบ real-time ได้ ในการวิจัยนี้ใช้เครื่อง และมีข้อมูลเทคนิคดังตารางที่ 5-9

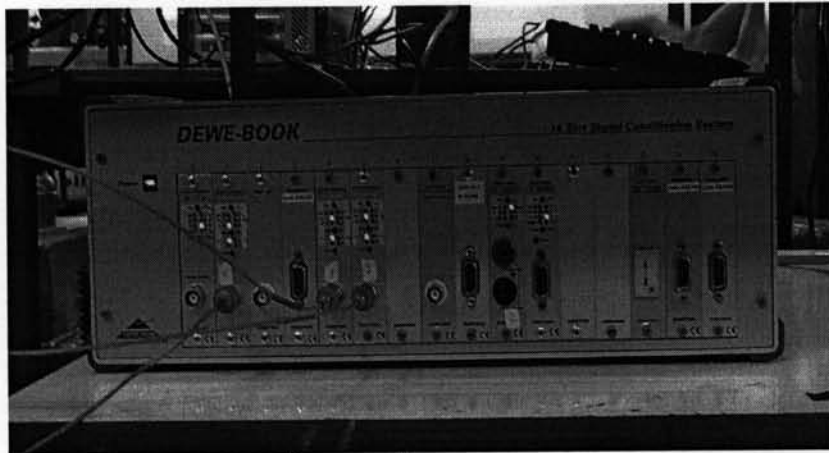
ตารางที่ 5-9 แสดงคุณสมบัติเครื่อง DEWETRON BOOK

General Specification	
Resolution	-0.1 degree with crank angle encoder at up to 8000 rpm on 1 channel -0.2 degree resolution with 4 channel up to 6000 rpm
Result display	Online mathematics and statistics Fast online displays (pressure diagram, P/V diagram,...)
Function	Powerful knocking recognition capability
Fast stream to disk mode Z1 MS/s)	



ตารางที่ 5-9 แสดงคุณสมบัติเครื่อง DEWETRON (ต่อ)

Input specification	
Max. channels	32
Internal amplifier slot	16
Sampling rate	Up to 1 MS/s total
Resolution	12 bit
Input	
±10 V	Standard
±50 V (isolated)	DAQP-V modules
Charge	DAQP-CHARGE-X modules
Crank or CA input	isolated

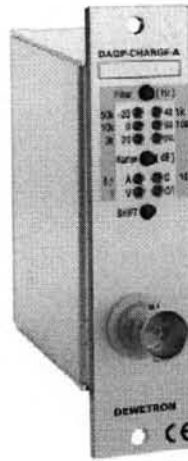


รูปที่ 5-27 เครื่อง DEWETRON

### 5.2.5 Dynamic signal amplifier

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณประจุไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจาก piezoelectric pressure transducer ให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า(analog) เพื่อนำไปแสดงผลหรือประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการต่อไป ในงานวิจัยนี้จะใช้ amplifier รุ่น DAQP-CHARGE-A จำนวน 3 ตัว เพื่อแปลงสัญญาณจาก Fuel line main chamber และ pre-chamber ดังแสดงในรูปที่ 5-28 มีข้อมูลเทคนิคดังตารางที่ 5-10



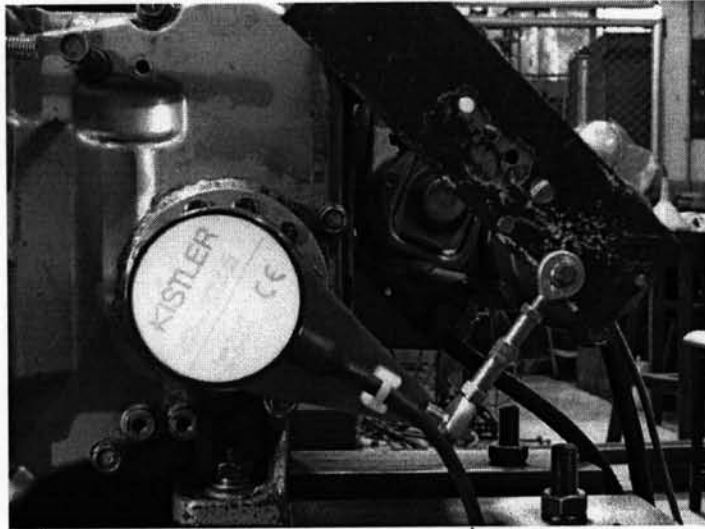


รูปที่ 5-28 แสดง Amplifier รุ่น SAQP-CHARGE-A  
ตารางที่ 5-10 แสดงข้อมูลเทคนิค Amplifier รุ่น DAQP-CHARGE-A

	DAQP-CHARGE-A
Supported sensors:	ICP <sup>®</sup> and charge sensors
Sensor type selection:	Push button or software
Input ranges:	
ICP <sup>®</sup> input:	0, 20, 40, 60 dB
Charge input:	0.1, 1, 10, 100, 1000 mV/pC
Gain accuracy:	1 % F.S.
Input range finetuning:	programmable
Range selection:	Push button (fixed) or software (all)
Integration:	Single (velocity), double (displacement)
LED indicators:	
Range and filter:	5 LEDs
ICP LED:	Active with connected ICP <sup>®</sup> sensor, inactive for charge input
OVL LED:	Overload control (output voltage > 5 V)
A, V and D LED:	Indicator for acceleration, velocity and displacement output
Constant current source:	3.8 to 5.6 mA, > 26 V
Filters (highpass):	0.1 Hz, 1 Hz, 10 Hz ( $\pm 2$ dB @ $f_0$ )
Filters (lowpass):	100 Hz, 1, 3, 10, 50 kHz ( $\pm 2$ dB @ $f_0$ )
Filter selection:	Push button or software
Filter characteristics:	Butterworth 80 dB / decade (24 dB / octave)
Bandwidth, -3dB	0.1 Hz to 50 kHz ( $\pm 2$ dB @ $f_0$ )
Typ. SNR @ max. bandwidth:	
Gain 0.1 and 1	90 dB
Gain 10	87 dB
Gain 100	73 dB
Gain 1000	54 dB
Gain 1000	60 dB @ 10 kHz
Output voltage:	$\pm 5$ V ( $\pm 6$ V peak voltage)
Output noise:	< 8 mV (all ranges with 50 kHz filter)
RS-485 interface:	Yes
Power supply voltage:	$\pm 9$ V <sub>DC</sub> ( $\pm 10$ %)
Power consumption:	0.6 W to 1.2 W (depending on sensor)

### 5.2.6 Crank angle encoder

Crank angle encoder เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ เพื่อส่งข้อมูลผ่าน light unit ให้ PC ซึ่งรันโปรแกรม visioscope ทราบถึงมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์และความเร็วรอบเครื่องยนต์ เพื่อควบคุมการบันทึกภาพอย่างถูกต้อง โดย crank angle encoder ที่ใช้สำหรับ AVL visioscope system เป็นยี่ห้อ Kistler รุ่น 2613B มีลักษณะดังรูปที่ 5-29 โดยได้แสดงรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 5-11



รูปที่ 5-29 แสดง crank angle encoder ยี่ห้อ Kistler รุ่น 2613B

ตารางที่ 5-11 ข้อมูลทางเทคนิคของ crank angle encoder ยี่ห้อ Kistler รุ่น 2613B

หลักการทำงาน	แบบ infrared transmissive lightgate
Crank angle encoder disc	แบบมี 360 angle marks, พร้อมกับมี 1 trigger mark
Dynamic angle shift	น้อยกว่า $\pm 0.02$ องศาข้อเหวี่ยง ที่ 10.0 rev/min
ช่วงความเร็ว	1 ถึง 20000 rev/min
ความสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้สูงสุด	150 g
อุณหภูมิแวดล้อมที่ยอมรับได้	-30 °C ถึง +60 °C
ความเสียหายที่สูญเสีย	น้อยกว่า 1 Watt ที่ 1000 rev/min

### 5.2.7 อุปกรณ์วัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

การวัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง จะนำถึงน้ำมันเชื้อเพลิงวางไว้บนตราชั่ง ซึ่งตราชั่งสามารถรับน้ำหนักได้ 60 กิโลกรัม Resolution เท่ากับ 2 กรัม และใช้นาฬิกาจับเวลา ปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 5-30



รูปที่ 5-30 แสดงอุปกรณ์การวัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

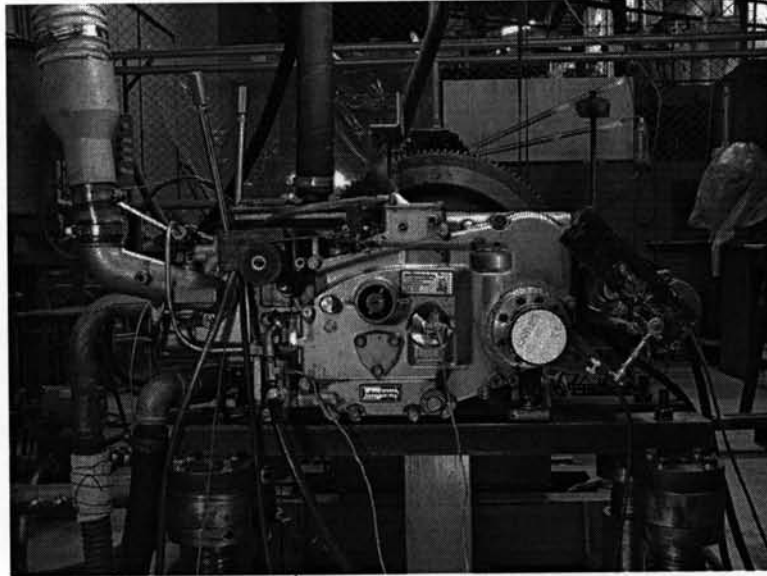
ตารางที่ 5-12 แสดงข้อมูลเทคนิคของตราซังที่ใช้วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

Model	JADEVER JWA - 60K
Capacity	60 kg
Resolution	2 g
Capacity	120 lb
Resolution	0.005 lb
Internal Resolution	1/600000
Pan size	320 x 240 mm
Sensitivity Drift	20 ppm / °C (5 – 35 °C )
Operating Temperature	-5 °C – 40 °C
Display	LCD with backlight, 7 digits
Power	110, 120, 220, 240VAC±10%, rechargeable battery for 60 hours
Dimension	390L x 345W x 120H (mm)
Option Module	1. Bi – direction RS232 Module box 2. Relay Module box

### 5.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบการถ่ายภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้

#### 5.3.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบถ่ายภาพห้องเผาไหม้

เครื่องยนต์ที่ถูกดัดแปลงให้เป็นเครื่องทดสอบวัดความดันห้องเผาไหม้เป็นเครื่องยนต์ CI ชนิด IDI ยี่ห้อ Kubota รุ่น ET-115 ดังแสดงในรูปที่ 5-31 โดยแสดงข้อมูลทางเทคนิคในตารางที่ 5-13



รูปที่ 5-31 แสดงเครื่องยนต์ทดสอบถ่ายภาพห้องเผาไหม้

ตารางที่ 5-13 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบถ่ายภาพห้องเผาไหม้

เครื่องยนต์:	Kubota
รุ่น:	ET 115
ชนิด:	CI สูบเดี่ยว 4 จังหวะ มีห้องเผาไหม้แบบ IDI swirl chamber
ขนาดกระบอกสูบ:	94 mm
ช่วงชัก:	90 mm
ปริมาตรกระบอกสูบ:	624 cm <sup>3</sup>
อัตราส่วนการอัด:	21
หัวฉีด:	แบบ throttling pintle ยี่ห้อ Nippon Denso รุ่น DN 15 SD-NK 1
ปั๊มฉีดเชื้อเพลิง:	แบบ single plunger ยี่ห้อ Nippon Denso รุ่น PFR 1 K
ความดันที่หัวฉีดเปิด:	120 kg/cm <sup>2</sup>
จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง:	20 °CA BTDC
จังหวะเปิด-ปิดลิ้นไอดี:	เปิด 20 °CA BTDC ปิด 45 °CA ABDC
จังหวะเปิด-ปิดลิ้นไอเสีย:	เปิด 50 °CA BBDC ปิด 15 °CA ATDC
ความยาวก้านสูบ	145.5 mm
ระบบระบายความร้อน	ระบายความร้อนด้วยน้ำแบบ forced convection
ระบบหล่อลื่น	แบบ forced lubrication

ระบบการถ่ายภาพที่ใช้เป็นของบริษัท AVL-List GmbH ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ กล้อง CCD พร้อม lens 25 mm และ 50 mm และ quick connector สำหรับ lens 50 mm และตัวยึดกล้อง (camera holder), endoscope สำหรับห้องเผาไหม้, window สำหรับห้องเผาไหม้, strobe gun, light unit, crank angle encoder, ระบบกรองอากาศ, PC และ AVL VisioScope software

### 5.3.2 CCD Camera

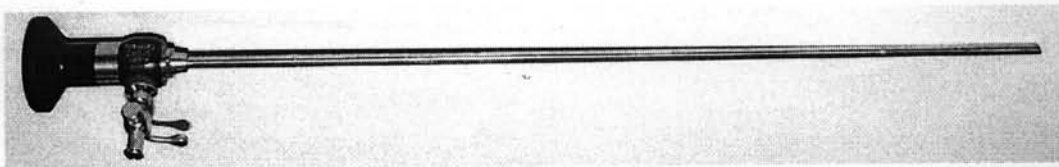
กล้อง CCD ที่ใช้เป็นรุ่น PixelFly VGA COLOR ซึ่งมี sensor เป็นแบบสี่ขนาด 1/2" มีความละเอียด (resolution) 640X480 พิกเซล ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เกิน 50 °C รูปที่ 5-32 แสดงรูปภาพของ CCD camera พร้อมอุปกรณ์เลนส์



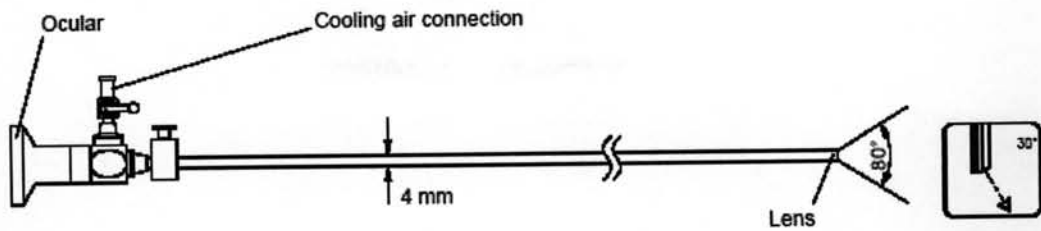
รูปที่ 5-32 CCD camera และเลนส์

### 5.3.3 Endoscope

ตัว endoscope มีหน้าที่ส่งผ่านแสงที่เปล่งออกมาจากการเผาไหม้หรือจากการใช้แหล่งกำเนิดแสงภายนอก ไปที่กล้องถ่ายรูป โดย endoscope แบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบที่ต้องการอากาศหล่อเย็น มีลักษณะดังรูปที่ 5-33 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm มุมเปิด (field of view) ที่ปลาย 80° ซึ่งมี endoscope สำหรับมุมมองต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ 0°, 30° และ 70° โดยในตารางที่ 5-14 จะแสดงข้อมูลทางเทคนิคของ endoscope ที่ใช้ ส่วนในรูปที่ 5-34 แสดง endoscope แบบ 30° ซึ่งถูกใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5-33 แสดง endoscope แบบที่ต้องการอากาศหล่อเย็น



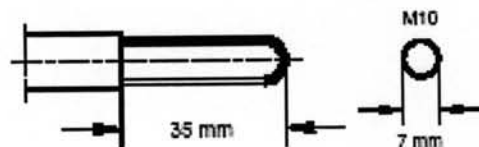
รูปที่ 5-34 แสดง endoscope แบบมุมมอง 30°

ตารางที่ 5-14 ข้อมูลทางเทคนิคของ endoscope

Three different viewing angle:	0° straight ahead
	30° forward view
	70° angled view
Field of view:	80° (wide-angle)
Length of shaft (working length):	330 mm
Tube diameter:	4 mm
Cooling medium:	clean compressed air (~6 bar)
Operating temperature uncooled:	150 °C max.

#### 5.3.4 Combustion chamber window

ใช้สำหรับป้องกัน endoscope จากสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูงในห้องเผาไหม้ โดย combustion chamber window ประกอบด้วย steel sleeve ที่ตัว window ติดตั้งอยู่ โดย window ทำมาจาก quartz glass มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 mm และมีให้เลือกใช้คู่กับ endoscope แต่ละมุมมองโดยเฉพาะ ในรูปที่ 5-35 แสดง window ที่ใช้กับ endoscope มุมมอง 30°



รูปที่ 5-35 แสดง combustion chamber window ที่ใช้กับ endoscope ที่มีมุมมอง 30°

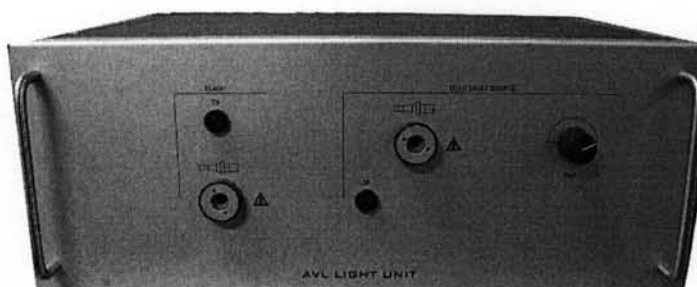
#### 5.3.5 Strobe Gun

ใช้ต่อเข้ากับ STROBE-GUN (X1) socket ของ Light Unit เพื่อหามุมที่ถูกต้องของสัญญาณ Trigger ระบุ TDC โดยใช้ "TDC shift"



### 5.3.6 Light Unit

เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้แก่ห้องเผาไหม้ ประกอบด้วย cold light source, Strobe flash gun และ AVL 427 Engine Timing Unit ดังแสดงในรูปที่ 5-36 และข้อมูลทางเทคนิคของ light unit แสดงไว้ในตารางที่ 5-15



รูปที่ 5-36 แสดง Light Unit

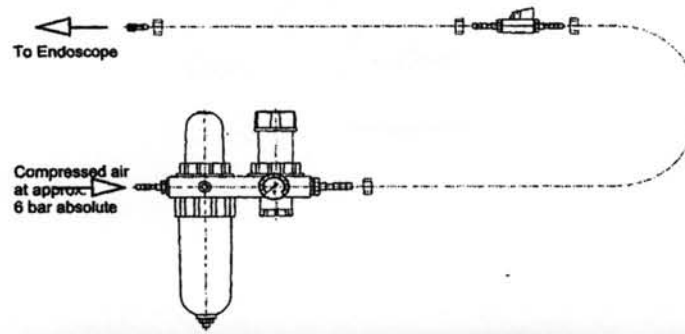
ตารางที่ 5-15 ข้อมูลทางเทคนิคของ light unit

Power Supply:	100 / 230 V switchable
<b>Strobe</b>	
Frequency:	10 Hz max.
Light yield with fibre optic cable:	40 mJ / flash
Flash duration:	20 $\mu$ s
<b>Cold light source</b>	
Halogen lamp:	150 W / 15 V

### 5.3.7 ระบบระบายความร้อน Endoscope

สำหรับการใช้อากาศอัดในการหล่อเย็น Endoscope ต้องใช้ระบบกรองอากาศ เพราะฝุ่นและน้ำมันในอากาศอัดสามารถทำให้เกิดการสะสมของสิ่งสกปรกซึ่งรวมตัวที่เลนส์ด้านหน้า ทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของรูปภาพ และอาจทำให้ชุดอุปกรณ์ endoscope รับแสงไม่ได้อย่างสิ้นเชิง รูปที่ 5-37 แสดงระบบกรองอากาศและปั๊มลม





รูปที่ 5-37 แสดงระบบกรองอากาศที่ใช้หล่อเย็น endoscope และปั๊มลม

ความดันอากาศอัดที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะต้องมีระดับความดันอยู่ที่ประมาณ 6 บาร์ สัมบูรณ์ และอุณหภูมิอากาศอัดต้องไม่เกิน 20 °C ถ้าอากาศอัดถูกป้อนที่ความดันที่ต่ำกว่าหรืออุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะทำให้ชุดอุปกรณ์ endoscope ร้อนเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ อุปกรณ์ นอกจากนี้ยังมีวาล์วควบคุมความดันแบบปรับได้ พร้อมมาตรวัดความดันที่รวมอยู่ใน Filter Unit เพื่อปรับความดันป้อนเข้า

### 5.3.8 PC และ VisioScope Software

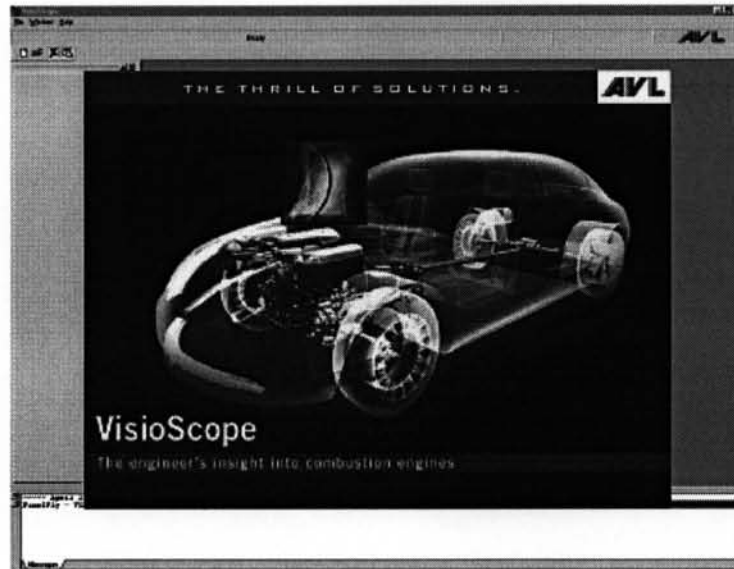
ข้อมูลทางเทคนิคของ PC ที่ใช้กับระบบนี้มีรายละเอียดดังตารางที่ 5-16

ตารางที่ 5-16 ข้อมูลทางเทคนิคของ PC

CPU:	Intel Pentium III Processor
Operating system:	Microsoft Windows NT 4.0 / 2000
SCSI controller:	Adaptec AHA2940 Wide SCSI Controller
Hard disk:	Ultra Wide SCSI hard disk
Power supply:	115 V / 230 V switchable

AVL VisioScope software เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท AVL-List GmbH ใช้สำหรับตั้งค่าเริ่มต้นของการถ่ายภาพ, ควบคุมการบันทึกการถ่ายภาพและการแสดงภาพ และประมวลผลภาพถ่ายที่ถ่ายโดยกล้อง CCD ออกมาในรูปแบบต่างๆ

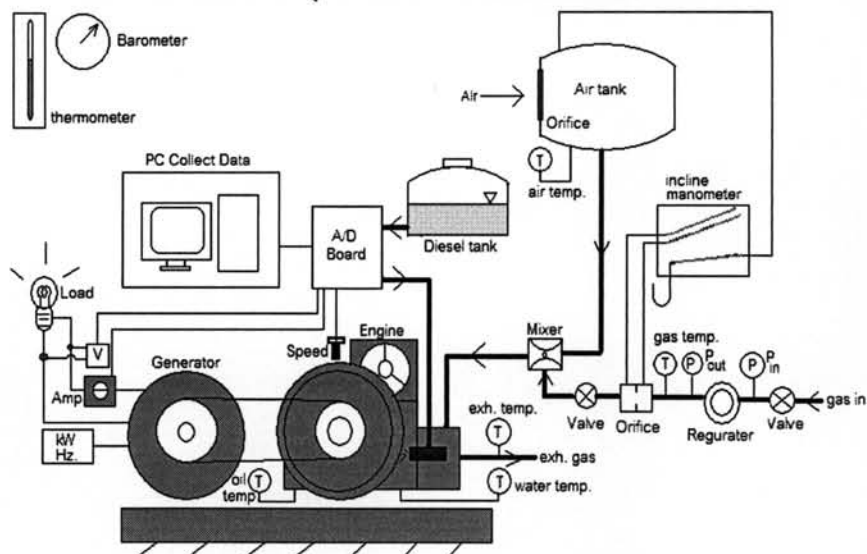
AVL VisioScope software ที่ใช้เป็น Version 1.1 TV และใช้ร่วมกับโปรแกรม Thermovision ซึ่งใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายออกมาในรูปของอุณหภูมิเปลวไฟดีเซล (diesel flame temperature) และความเข้มข้นของเขม่า (soot concentration) ด้วยหลักการของ two-color method



รูปที่ 5-38 แสดง AVL VisioScope Software

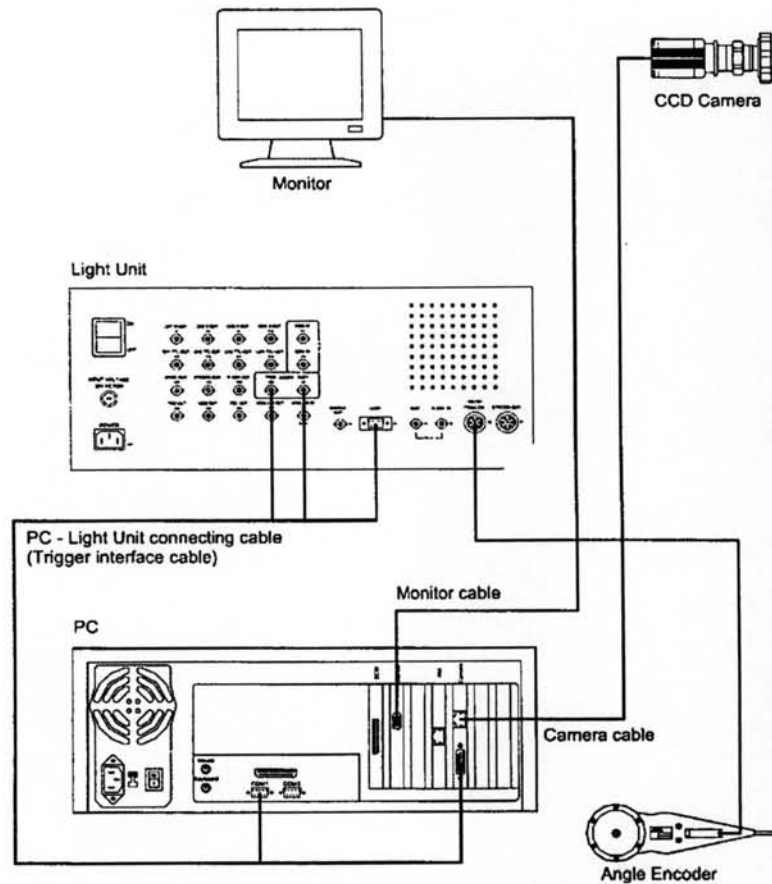
## 5.4 แผนผังโดยรวมของอุปกรณ์ต่างๆในห้องทดสอบ

### 5.4.1 แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ



รูปที่ 5-39 แสดงแผนผังการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบสมรรถนะ

## 5.4.2 แผนผังการต่อระบบการถ่ายภาพ



รูปที่ 5-40 แผนผังการต่อระบบการถ่ายภาพ

## 5.5 เชื้อเพลิงทดสอบ

### 5.5.1 เชื้อเพลิงดีเซลอ้างอิง (Base Diesel)

ในงานวิจัยนี้ใช้เชื้อเพลิงดีเซลจาก บริษัท ระยองเพียวริฟายเออร์ จำกัด(มหาชน)

### 5.5.2 เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก (Alternative Diesel)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเตรียมน้ำมันเชื้อเพลิง

ก. หม้อต้ม ใช้ในการอุ่นและผสมน้ำมันเตากับเคโรซีน สามารถปรับตั้ง

ค่าอุณหภูมิได้ ดังรูปที่ 5-41



รูปที่ 5-41 แสดงหม้อต้มที่ใช้ในการทดสอบ








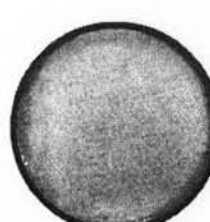
ข. บีกเกอร์ตวง บีกเกอร์ตวงใช้เพื่อตวงปริมาณของน้ำมันเตา และ เคโรซีน ในการผสมดังรูปที่ 5-42



รูปที่ 5-42 แสดงบีกเกอร์ตวงที่ใช้ขนาด 5,000 ml

จากงานวิจัยของ คณิต วัฒนวิเชียร [42] ได้ทำการวิเคราะห์ผลของการใช้น้ำมันดีเซลทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ในการเลือกหาส่วนผสมของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก ซึ่งพบว่าที่ส่วนผสมน้ำมันเตาต่อเคโรซีนที่ 50: 50 มีปริมาณตะกอนมากที่สุด คือ 23% ต่อน้ำหนักทั้งหมดของเชื้อเพลิง และ ที่ส่วนผสมน้ำมันเตาต่อเคโรซีนที่ 30: 70 มีปริมาณตะกอนน้อยที่สุดคือ 0.80% ต่อน้ำหนักทั้งหมดของเชื้อเพลิง สรุปได้ว่าปริมาณตะกอนที่เกิด จะแปรตามอัตราส่วนของน้ำมันเตา ในส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 5-17

ตารางที่ 5-17 แสดงผลการผสมเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนต่างๆ [42]

อัตราส่วนผสม	ตัวอย่างน้ำมัน	ผ้ากรอง	%น้ำหนักของตะกอน
น้ำมันเตา 50% + เคโรซีน 50%			23.00 %
น้ำมันเตา 40% + เคโรซีน 60%			2.26 %
น้ำมันเตา 35% + เคโรซีน 65%			1.07 %
น้ำมันเตา 30% + เคโรซีน 70%			0.80 %

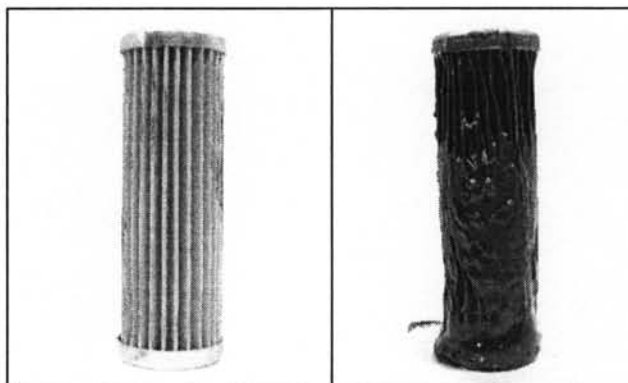
เมื่อพิจารณาจากตะกอนที่เกิดจากอัตราส่วนผสมต่างๆ ได้ทดลองนำน้ำมันเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มาใช้กับเครื่องยนต์ เพื่อศึกษาถึงความมีเสถียรภาพของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่จะสามารถใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยไม่เกิดปัญหาการอุดตันของระบบเชื้อเพลิง ในการทดสอบ ใช้เครื่องยนต์ Kubota ET115 ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที สภาวะไม่มีภาระ

โดยทำการทดลองวันละ 8 ชั่วโมง และทำการบันทึก จำนวนวันที่เครื่องยนต์สามารถใช้งานได้โดยไม่มีปัญหาการอุดตัน ของกรองเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 5-18

ตารางที่ 5-18 ผลการทดลองเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมต่างๆมาใช้กับเครื่องยนต์

อัตราส่วนผสม		จำนวนวันที่สามารถใช้งานได้ (วัน)
น้ำมันเตา (ร้อยละ)	เคโรซีน (ร้อยละ)	
50	50	0
40	60	3
35	65	7
30	70	30

จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนผสมน้ำมันเตาต่อเคโรซีนที่ 50 : 50 ไม่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้เนื่องจากเกิดปัญหากรองเชื้อเพลิงอุดตัน คือมีไขและตะกอนเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากที่กรองเชื้อเพลิง ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถผ่านกรองเชื้อเพลิงได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-43 ที่ส่วนผสมน้ำมันเตาต่อเคโรซีนที่ 35 : 65 และ 40 : 60 พบว่าสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้เพียงในช่วงเวลาสั้น เพราะเกิดปัญหากับกรองเชื้อเพลิงอีกเช่นกัน สำหรับส่วนผสมน้ำมันเตาต่อเคโรซีนที่อัตราส่วนผสม 30 : 70 พบว่าสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้ระยะยาว ประมาณ 30 วัน



รูปที่ 5-43 แสดงกรองเชื้อเพลิงใหม่(ซ้าย) และกรองเชื้อเพลิงที่อุดตัน(ขวา)

จากผลการวิจัยของ คณิต วัฒนวิเชียรและสุวัช คำแผ่ด [42] ที่ได้ จึงเลือกน้ำมันดีเซลทางเลือกที่ได้จากการผสมน้ำมันเตาต่อเคโรซีน 30: 70 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณตะกอนน้อยที่สุด และมีเสถียรภาพมากที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น มาใช้ในงานวิจัยนี้

### 5.5.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ

ในการวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงอ้างอิงจากแหล่งเดียวกันตลอดทั้งน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลทางเลือก เพื่อที่จะนำผลมาเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 5-19 ตารางที่ 5-19 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล[43], น้ำมันดีเซลทางเลือก [44] น้ำมันเตา [45] และเคโรซีน [46]

Properties	Test Method	Diesel Spec	Diesel	Alternative Diesel	Fuel Oil	IK
API@60/60 °F	ASTM D1298		-	36.7	27.5	43.4
Density @ 15 °C,kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052		0.837	0.8411	0.8892	0.8086
Flash Point, °C	ASTM D93	52 min.	61	65	>100	59
Sulfur content,ppm	ASTM D4294	350 ppm	296	504	1182	-
Pour point , °C	ASTM D97	10max	7	7	57.0	-
Color, ASTM	ASTM D1500	4	1.0	>8	-	-
Kinematic Viscosity @ 40 °C,cst	ASTM D445	1.8-4.1	2.199	3.785	14.7	-
Heating Value ,MJ/kg		44.50min	45.56	44.664	43.955	48.202

## 5.6 วิธีดำเนินการวิจัย

### 5.6.1 การทดสอบสมรรถนะ

ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

#### 5.6.1.1 การ Run in

หลังจากเปลี่ยนชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ใหม่ ได้ทำการ run in เครื่องยนต์โดยการเดินเครื่องยนต์ตามวัฏจักรภาระที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งวัฏจักรดังกล่าวประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้



1. ไม่มีภาระ (No load) ความเร็วรอบ 2,400 rev/min ระยะเวลา 30 นาที
2. มีภาระ 50% ของ rated power ความเร็วรอบ 2,400 rev/min  
ระยะเวลา 30 นาที
3. มีภาระ 100% ของ rated power ความเร็วรอบ 2,400 rev/min  
ระยะเวลา 20 ชั่วโมง

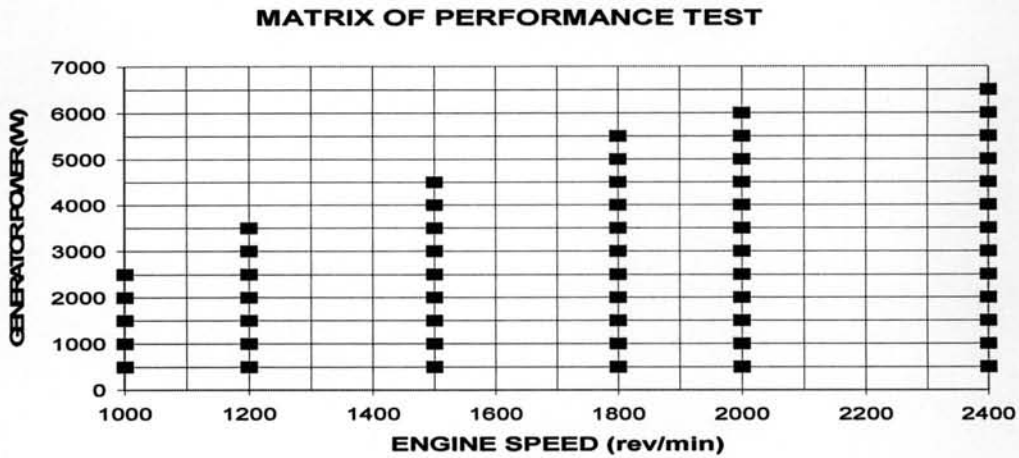
ภายหลังเสร็จสิ้นการ Run in ได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องใหม่ก่อนเริ่มทำการทดสอบ การทดสอบสมรรถนะเริ่มจากการใช้น้ำมันดีเซล จากนั้นจะทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง และทำการเปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นน้ำมันดีเซลทางเลือก โดยทำการเดินเครื่องยนต์ช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อเป็นการไล่น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลที่ทดสอบก่อนหน้านี้

#### 5.6.1.2 การทดสอบที่ภาระสูงสุด (Full-Load Performance Test)

ก่อนทำการทดสอบที่สภาวะภาระสูงสุด จะทำการ warm up เครื่องยนต์จนระบบน้ำหล่อเย็นได้อุณหภูมิทำงาน คือไม่ต่ำกว่า 80 °C จากนั้นเริ่มทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าแรงบิดกับความเร็วรอบ ที่สภาวะภาระสูงสุด (Full Load) เริ่มจากปรับคันเร่งให้เครื่องยนต์หมุนเปล่าโดยไม่มีภาระจนความเร็วรอบอยู่ที่ 2,550 รอบต่อนาที จัดให้เป็นตำแหน่งที่คันเร่งเปิดสุด (ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต) จากนั้นเริ่มใส่ภาระให้กับเครื่องยนต์โดยการเปิดหลอดไฟที่ละดวง รอบของเครื่องยนต์จะลดลงเรื่อยๆ ตามภาระที่เพิ่มให้กับเครื่องยนต์ จนความเร็วรอบของเครื่องยนต์ลดลงมาที่ 2,400 รอบต่อนาที รอให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัว ที่จุดนี้คือสภาวะสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที แล้วจึงเริ่มบันทึกข้อมูลจากการวัดค่าต่างๆ ที่ส่งเข้ามาที่ตู้แผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ (A/D Board) แล้วเก็บไว้ในฐานข้อมูล (Data Logger) ของโปรแกรมที่ได้ออกแบบสำหรับการทดสอบโดยเฉพาะ ข้อมูลที่ทำการวัด ได้แก่ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที), ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์), ความต่างศักย์ (โวลท์), ค่ากำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์), อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (องศาเซลเซียส), อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น (องศาเซลเซียส), อุณหภูมิไอเสีย (องศาเซลเซียส), อุณหภูมิไอดี (องศาเซลเซียส), อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์), อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และค่าควันท่อ จากนั้นเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์จนความเร็วรอบของเครื่องยนต์ลดมาที่ 2,000 รอบต่อนาที รอให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัวแล้วจึงบันทึกค่า และกระทำเช่นเดียวกันที่ความเร็ว 1,800 1,500 1,200 และความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที รวมทั้งหมด 6 จุดทดสอบ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วรอบที่สภาวะภาระสูงสุด (Full Load)

### 5.6.1.3 Engine Performance Test

จากความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างภาระสูงสุดและความเร็วรอบที่ได้จากการทดสอบ ภาระสูงสุดจะถูกนำมากำหนดจุดในการทดสอบ (Matrix) ที่ความเร็วและที่ กำลังไฟฟ้าต่างๆ สำหรับการทดสอบ engine performance test ดังแสดงในรูปที่ 5-44



รูปที่ 5-44 แสดง matrix ที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์

จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะ ณ จุดทำงานตามจุดทดสอบบน Matrix ที่กำหนดในรูปที่ 5-44 ซึ่งเป็นการทดสอบสมรรถนะที่สภาวะภาระบางส่วน (Part - Load) ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ โดยลำดับการทดสอบจะเริ่มจากความเร็วรอบต่ำสุดก่อน และเริ่มจากภาระต่ำไปหาภาระสูงจนครบทุกภาระในความเร็วรอบนั้น จึงเปลี่ยนไปทดสอบในความเร็วรอบที่สูงขึ้นถัดไป ทุกครั้งที่เปลี่ยนความเร็วรอบเครื่องยนต์ต้องดับเครื่องยนต์เพื่อทำการเปลี่ยนชุดมู่เล่ ที่ตำแหน่งล้อช่วยแรงและเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้ได้อัตราทดจากรอบเครื่องยนต์ไปสู่ความเร็วรอบคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ 1,500 รอบต่อนาที

ก่อนทำการทดสอบ จะต้อง warm up เครื่องยนต์จนระบบน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิทำงานคือไม่ต่ำกว่า 80 °C จากนั้นจึงเริ่มการทดสอบ จากจุดแรก กล่าวคือเริ่มทดสอบจาก จุดที่มีความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที และภาระ 500 วัตต์ เมื่อปรับเครื่องยนต์จนตรงตามจุดทำงานที่ต้องการแล้ว รอให้เครื่องยนต์อยู่ที่สภาวะคงตัว จึงเริ่มบันทึกข้อมูลจากการวัดค่าต่างๆ เช่นเดียวกับการทดสอบที่สภาวะสูงสุด จากนั้นจะเปลี่ยนไปทดสอบจุดทำงานต่อไปด้วยการค่อยๆ เพิ่มภาระขึ้นด้วยการเปิดโหลดไฟเพิ่มตามจำนวนวัตต์ที่ต้องการ เมื่อครบทุกจุดแล้ว จึงเปลี่ยนความเร็วรอบ แล้วกระทำเช่นเดียวกันจนครบตามจุดทดสอบที่ได้กำหนด นำค่าแรงบิดและอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงไปคำนวณปรับค่าที่สภาวะอากาศมาตรฐาน แล้วนำค่าที่ปรับแล้วมาแสดงในรูปแผนภูมิสมรรถนะ (Performance Map) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ความเร็วรอบ และอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยพิจารณาเป็นสองแผนภูมิ ได้แก่ แผนภูมิ

สมรรถนะจากน้ำมันดีเซล และแผนภูมิสมรรถนะจากน้ำมันดีเซลทางเลือก เพื่อจะได้เปรียบเทียบถึงความแตกต่างระหว่างสองเชื้อเพลิง

### 5.6.2 การวัดความดันในห้องเผาไหม้

การเลือกจุดทำงานได้ดัดแปลงวัฏจักรการทดสอบตามมาตรฐาน ESC Test Cycle (ดูภาคผนวก ค) กล่าวคือทำการทดสอบที่ความเร็วรอบเช่นเดียวกับ ESC Test Cycle คือ 1400, 1800, 2100 rpm และกำหนดภาระที่ทดสอบสามระดับ ได้แก่ ที่ 25 % Load (10 Nm) ที่ 50 % Load (20 Nm) และที่ 75 % Load (30 Nm) ซึ่งจุดทำงานที่เลือกในการทดสอบนี้มีทั้งหมด 9 จุดทำงาน มีรายละเอียดดังตารางที่ 5-20

ตารางที่ 5-20 ตารางแสดงจุดที่ทดสอบ

Speed (rpm)	Torque (Nm)		
1400	10	20	30
1800	10	20	30
2100	10	20	30

#### 5.6.2.1 การทดสอบ

การทดสอบกระทำในห้องปฏิบัติการที่สภาวะคงตัว ที่ภาระและความเร็วรอบคงที่ ที่ละจุดทำงานตามตารางที่ 5-19 จากนั้นทำการวัดความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด และองศาเพลาช้อเหวี่ยง ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาอัตราการฉีดเชื้อเพลิงได้โดยใช้สมการ (2-16) อัตราการปล่อยความร้อนสามารถคำนวณโดยใช้สมการ (2-13) ปริมาณการปล่อยความร้อนสุทธิ สามารถหาได้จากสมการ (2-14) และ สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (2-15) ซึ่งผลที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป เช่น มุมช้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง มุมช้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการเผาไหม้ มุมช้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการเผาไหม้ ช่วงล่าช้าของการเผาไหม้ (Ignition delay) และ อัตราการเผาไหม้

#### 5.6.2.2 การวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการปล่อยความร้อน

การบ่งชี้สภาวะการเผาไหม้กระทำโดยพิจารณาอัตราการปล่อยความร้อนที่คำนวณได้จาก ผลการทดสอบในข้อ ก. โดยกำหนดเงื่อนไขจากนิยามต่อไปนี้

- 1) มุมช้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง พิจารณาจากมุมช้อเหวี่ยงที่ความดันในห้องจ่ายเชื้อเพลิงเข้าหัวฉีดมีค่าสูงกว่า Injector opening pressure
- 2) การบ่งชี้มุมช้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการเผาไหม้ พิจารณาจากมุมช้อเหวี่ยงที่ค่าอัตราการปล่อยความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าศูนย์ครั้งแรก
- 3) การบ่งชี้มุมช้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการเผาไหม้ พิจารณาจากมุมช้อเหวี่ยงที่อัตราการปล่อยความร้อนลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ครั้งแรก

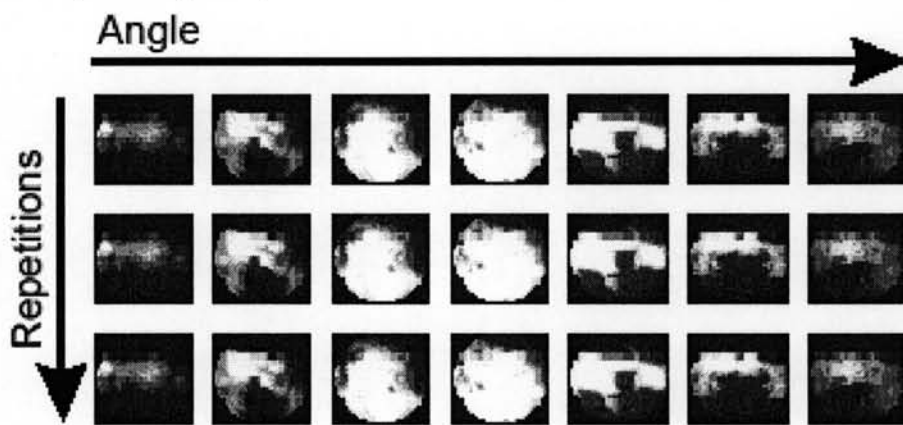
4) ช่วงล่าช้าของการเผาไหม้ (Ignition delay) บ่งชี้จากช่วงมุมข้อเหวี่ยงระหว่างจุดเริ่มฉีดเชื้อเพลิงถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้

5) อัตราการเผาไหม้ บ่งชี้จากอัตราการปล่อยความร้อน

ในส่วนการบันทึกข้อมูลขณะทดสอบสมรรถนะ จะแสดงในภาคผนวก ง และการวัดข้อมูลความดันภายในห้องเผาไหม้ แสดงในภาคผนวก จ

### 5.6.3 การถ่ายภาพในห้องเผาไหม้

ถ่ายภาพภายในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าแต่ละจุดทำงาน กระทำในห้องปฏิบัติการที่สภาวะคงตัว ที่ภาระและความเร็วรอบคงที่ ที่ละจุดทำงานตามตารางที่ 5-19 โดยในการบันทึกภาพบนหน่วยความจำจะเก็บในโครงสร้างที่เรียกว่า record ซึ่งมีโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 5-45 โดยภาพที่เรียงตามแนวนอนเป็นภาพที่ได้จากการบันทึกตามมุมข้อเหวี่ยง ส่วนภาพในแนวตั้งเป็นการบันทึกซ้ำ (repetitions) ตามมุมข้อเหวี่ยงเดิม โดยในแต่ละภาพจะได้รับการบันทึกที่ cycle ต่างกัน ซึ่งแบ่งการบันทึกข้อมูลออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบมีแสงแฟลชช่วย และแบบไม่ใช้แสงไฟใดๆทั้งสิ้น การบันทึกแบบมีแสงแฟลชช่วย จะใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมจากการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ช่วย ส่วนการบันทึกแบบไม่ใช้แสงไฟใดๆทั้งสิ้นจะใช้ในการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟ ดีเซล ความเข้มข้นของเขม่า และคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดเปลวไฟที่ตำแหน่งใดๆในรอบการบันทึก (Repetitions) ต่างๆ



รูปที่ 5-45 แสดงโครงสร้างการบันทึกภาพ

ในการทดสอบนี้ จะกำหนดค่าองศาข้อเหวี่ยงที่จะทำการบันทึก คือ อยู่ในช่วง  $-10^{\circ}\text{CA}$  ถึง  $40^{\circ}\text{CA}$  เพื่อให้ครอบคลุมถึงจุดเริ่มต้นที่มีการฉีดเชื้อเพลิงจนถึงสิ้นสุดการเผาไหม้ และกำหนดการบันทึกซ้ำอีก 6 ครั้ง (7 Repetitions: Repetition ที่ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6) ซึ่งการกำหนดการบันทึกซ้ำนี้จะขึ้นกับพื้นที่ของหน่วยความจำสูงสุดของคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ได้

### การประมวลผลจากภาพถ่าย (Image-Processing)

**ปรากฏการณ์การเกิดสเปรย์** ในการสังเกตการเกิดสเปรย์จากภาพถ่ายโดยตรงแบบมีแสงแฟลชช่วย สามารถพิจารณา มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มเกิดสเปรย์ (start of injection), ลักษณะการเคลื่อนที่ของสเปรย์, มุมของสเปรย์ (spray angle), ระยะพุ่งของสเปรย์ (spray penetration)

เพื่อลดผลกระทบจากการเกิด cycle by cycle variation ก่อนทำการวิเคราะห์ ควรทำการเฉลี่ยภาพที่บันทึกได้ที่มุมข้อเหวี่ยงเดียวกัน ซึ่งมีหลาย repetition เสียก่อน โดยใช้ **ฟังก์ชัน average repetition** ในโปรแกรม AVL Vioscope โดยโปรแกรมจะทำการเฉลี่ยค่าความสว่างของสีในแต่ละ pixel ที่ตำแหน่งเดียวกัน บนรูปที่อยู่มุมเพลวข้อเหวี่ยงเดียวกัน จากหลาย repetition

**การวิเคราะห์ลักษณะปรากฏการณ์การเกิดสเปรย์** ลักษณะปรากฏการณ์ของการเกิดสเปรย์ และมุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มเกิดสเปรย์ สามารถสังเกตได้โดยตรงจากภาพถ่าย

**ปรากฏการณ์การเผาไหม้** การสังเกตภาพถ่ายการเผาไหม้โดยตรงแบบไม่มีแสงแฟลช สามารถพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ขนาดของบริเวณเปลวไฟ และลักษณะการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ เมื่อเทียบกับมุมข้อเหวี่ยง เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจาก cycle by cycle variation ก่อนทำการพิจารณาภาพถ่ายการเผาไหม้ ต้องมีการเฉลี่ยโดยใช้ฟังก์ชัน **average repetition**

### การวิเคราะห์สภาวะของการเผาไหม้

การวิเคราะห์สภาวะของการเผาไหม้สามารถทราบถึง เวลาที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ เวลาสิ้นสุดการเผาไหม้ และช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้ โดยพิจารณาจากภาพถ่ายได้ดังนี้

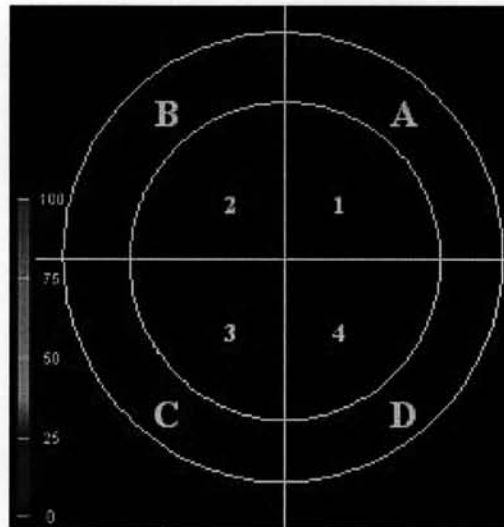
- 1) มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ (Start of combustion) พิจารณาจากภาพแรกที่เห็นเปลวไฟในห้องเผาไหม้
- 2) มุมข้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (End of combustion) พิจารณาจากภาพสุดท้ายที่เห็นเปลวไฟในห้องเผาไหม้
- 3) ช่วงมุมข้อเหวี่ยงที่เกิดการเผาไหม้ (Combustion duration) พิจารณาจากจุดที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ถึงเวลาสิ้นสุดการเผาไหม้
- 4) มุมข้อเหวี่ยงที่มีอัตราการเผาไหม้สูงสุดพิจารณาจากภาพการแจกแจงอนุกรมที่มีค่าอนุกรมเฉลี่ยสูงสุด
- 5) ช่วงล่าช้า (Ignition delay) พิจารณาจากภาพแรกที่มองเห็นสเปรย์จากปลายหัวฉีด (จากภาพถ่ายแบบมี flash) และภาพแรกที่เห็นเปลวไฟในห้องเผาไหม้

**การวิเคราะห์การแจกแจงความน่าจะเป็นที่จะเกิดเปลวไฟ** เป็นการบ่งชี้ถึงตำแหน่ง ขนาดของบริเวณเปลวไฟ และลักษณะการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ ที่มีโอกาสเกิดขึ้น ณ



บริเวณภายในห้องเผาไหม้ สามารถวิเคราะห์จากการถ่ายภาพการเผาไหม้โดยตรงแบบไม่ใช้แสงแฟลชที่ยังไม่ได้ทำการเฉลี่ยโดยใช้ ฟังก์ชัน Probability Distribution ซึ่งต้องทำการใส่ค่า threshold ที่เหมาะสมของสีน้ำเงินด้วยภาพผลลัพธ์ที่ได้เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นที่จะเกิดเปลวไฟ (scale 0-100%)

จากนั้นนำภาพผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์โดยแบ่งพื้นที่ภาพห้องเผาไหม้ออกเป็น 8 ส่วน ได้แก่พื้นที่ส่วนใน (1,2,3 และ 4) และพื้นที่ส่วนนอก(A, B, C และ D) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ของเปลวไฟที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด (ความน่าจะเป็นในการเกิดเปลวไฟในช่วง 75-100%) ดังรูป 5-46



รูปที่ 5-46 การแบ่งพื้นที่เป็น 8 ส่วนเพื่อพิจารณาแนวโน้มของทิศทางการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ

#### 5.6.4 การวิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่างภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้และอัตราการปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้

การวิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่างภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ และอัตราการปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้ที่ประเมินจากข้อมูลความดันภายในห้องเผาไหม้ เป็นการยืนยันถึงผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายว่ามีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการเผาไหม้เชิงปริมาณที่ได้จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ โดยใช้การวิเคราะห์ช่วงเวลาการเผาไหม้จากภาพถ่ายดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.6.3.1 เทียบกับการวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.6.2.2