

การศึกษาพฤติกรรมตัวแปรเชิงปริมาตรและความยาวของระบบท่อไอดี
สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

STUDY THE BEHAVIOR OF VOLUMETRIC PARAMETERS AND LENGTH
PARAMETERS OF AIR INTAKE SYSTEM FOR FORMULA STUDENT CAR

จิรเมธ บุญศักดิ์ดา
พัฒนสินี สอนเย็น
รัตภูมิ เกศกะงาม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมตัวแปรเชิงปริมาตรและความยาวของระบบท่อไอดี
สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

STUDY THE BEHAVIOR OF VOLUMETRIC PARAMETERS AND LENGTH
PARAMETERS OF AIR INTAKE SYSTEM FOR FORMULA STUDENT CAR

จิรเมธ	บุญศักดิ์
พัฒนสินี	สอนเย็น
รัตภูมิ	เกศกะงาม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

STUDY THE BEHAVIOR OF VOLUMETRIC PARAMETERS AND LENGTH
PARAMETERS OF AIR INTAKE SYSTEM FOR FORMULA STUDENT CAR

JIRAMED

BOONSAKDA

PATSINEE

SORNYEN

RATTAPOOM

KESKANGAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมตัวแปรเชิงปริมาตรและความยาวของระบบท่อไอดีสำหรับรถแข่ง
สูตรนักศึกษา

Study The Behavior of Volumetric Parameters and Length Parameters of
Air Intake System for Formula Student Car

ผู้จัดทำ

1. นาย จิรเมธ บุญศักดิ์ดา รหัสประจำตัว 53010217
2. นางสาว พัฒน์สินี สอนเย็น รหัสประจำตัว 53011099
3. นาย รัตภูมิ เกศกะงาม รหัสประจำตัว 53011363



อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์)

การศึกษาพฤติกรรมตัวแปรเชิงปริมาตรและความยาวของระบบท่อไอดีสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

นายจิรเมธ	บุญศักดิ์	รหัสประจำตัว	53010217
นางสาวพัฒนสินี	สอนเย็น	รหัสประจำตัว	53011099
นายรัตภูมิ	เกศกะงาม	รหัสประจำตัว	53011363
ผศ.ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2556			

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของท่อพักอากาศและความยาวของท่อไอดีในเครื่องยนต์ประเภทสูบเดี่ยว เพื่อใช้ในการแข่งขันรถแข่งสูตรนักศึกษาเป็นการศึกษาเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปของเครื่องยนต์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเชิงปริมาตร โดยการปรับเปลี่ยนระยะความยาวของท่อร่วมไอดีและปริมาตรของท่อพักอากาศ เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถสร้างกำลังสูงสุดตามรอบเครื่องยนต์ที่ออกแบบ มีการทดสอบโดยไดนามิเตอร์ เช่นเซอร์วัดมวลการไหลของอากาศ เช่นเซอร์วัดความดัน เช่นเซอร์วัดปริมาณออกซิเจนคงเหลือ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยที่ผลลัพธ์นั้นปรากฏว่าแนวโน้มของกำลังเครื่องยนต์จะสูงขึ้นเรื่อยๆตามปริมาตรของท่อพักอากาศ ส่วนความยาวท่อร่วมไอดีมีแนวโน้มว่าความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่จะเกิดแรงบิดสูงสุดจะแปรผกผันกับความยาวท่อร่วมไอดีตามสมการของHelmholtz เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบท่อไอดีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

Study The Behavior of Volumetric Parameters and Length Parameters of Air Intake System for Formula Student Car

Jiramed	Boonsakda	53010217
Patsinee	Sornyen	53011099
Rattapoom	Keskangam	53011363
Asst.Prof.Dr.Chinda Charoenphonphanich		Advisor
Year 2013		

ABSTRACT

Study about variable in intake plenum volume and intake runner length on single cylinder engine for Formula Student. To understand the behavior of engine when change in volume and length of intake. Intake design theory says that peak torque will appear at design engine speed, it is depended on runner length and plenum volume. Data is collected by Dynamometer, Mass air flow sensor, Manifold absolute pressure sensor and Oxygen sensor. For plenum trend, power is increase by larger plenum volume. And for runner trend, engine speed which get a maximum torque is inversely relate to runner length from Helmholtz's equation. Testing data is used to analysis and summary which volume and length is the most suitable for Formula Student.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จจุล่งได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยเสมอมา จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร.ปรีชา การินทร์ผู้ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการนำเสนอ งานวิจัยรวมถึงการจัดทำปริญญาานิพนธ์ ขอขอบคุณบริษัท ชูชุกี มอเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด ผู้สนับสนุนเครื่องยนต์ในการจัดทำรถแข่งสูตรนักศึกษา นายประทาน ศรีชัย ผู้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์การวัดและบันทึกข้อมูลในงานวิจัย รวมถึงโปรแกรมด้านการจัดเก็บบันทึกข้อมูล นายวิทวัส อิมเอิบ และนายพัฒน์ น้อมธงไทย ผู้ให้คำแนะนำด้านวิธีการใช้งานและทดสอบงานวิจัยโดย ไดนาโมมิเตอร์ นายวาทัญญู ไพโรจน์ ผู้ให้ความช่วยเหลือในการซ่อมบำรุงมอเตอร์พัฒลมสำหรับ ไดนาโมมิเตอร์ และขอขอบคุณสมาชิกชมรมยานยนต์ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย และจัดทำรถแข่งสูตรนักศึกษา

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบความรู้ตลอดจนสามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้จริง และเปิดโอกาสให้ได้แสดงความสามารถในการทำปริญญาานิพนธ์ รวมถึงเพื่อนที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ที่ให้การสนับสนุนและมอบโอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มความสามารถ เป็นทั้งผู้ให้กำลังใจและเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายจิรเมธ	บุญศักดิ์
นางสาวพัฒนสินี	สอนเย็น
นายรัตภูมิ	เกศกะงาม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
รายการสัญลักษณ์.....	XII
ตัวอักษร	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สี่จังหวะ	3
2.2.1 จังหวะดูด (Intake stroke).....	3
2.2.2 จังหวะอัด (Compression stroke).....	3
2.2.3 จังหวะระเบิด (Power stroke).....	3
2.2.4 จังหวะคาย (Exhaust stroke).....	4

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 อัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันเชื้อเพลิง	4
2.4 ระบบไอดี.....	6
2.4.1 เรือนลิ้นเร่ง (Throttle Body).....	6
2.4.2 ตัวจำกัดอากาศ (Restrictor).....	7
2.4.3 ท่อพักอากาศ (Plenum)	9
2.4.4 ปากแตร (Bellmouth).....	9
2.4.5 ท่อร่วมไอดี (Runner).....	11
2.5 ผลของความเร็วอากาศต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาตร.....	13
บทที่ 3 การออกแบบ	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 การออกแบบท่อพักอากาศ	14
3.3 การออกแบบท่อร่วมไอดี.....	16
บทที่ 4 อุปกรณ์ทดลองและวิธีการทดลอง	18
4.1 บทนำ.....	18
4.2 รายละเอียดการทดลอง.....	18
4.3 อุปกรณ์การทดลอง	19
4.4 เครื่องมือวัดและเครื่องมือบันทึกผลการทดลอง	20
4.5 การสอบเทียบเครื่องมือวัด	22
4.6 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดลอง	23
4.7 ขั้นตอนการทดลอง	24
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 ผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์.....	25
5.2 ผลของปริมาตรท่อพักอากาศ.....	25
5.2.1 ระบบไอดีแบบไม่มีท่อพักอากาศ.....	25
5.3 ผลของความยาวท่อไอดี.....	33
5.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมด.....	36
บทที่ 6 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	37
6.1. วิเคราะห์ผลการทดลอง	37
6.2. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
6.3. อุปสรรคและแนวทางแก้ไข	37
6.4 ข้อเสนอแนะ	38
บรรณานุกรม.....	39
บรรณานุกรม (ต่อ)	40
ภาคผนวก ผลการทดลอง.....	41

สารบัญรูปรภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	รถแข่งสูตรนักศึกษา.....	1
รูปที่ 2.1	การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน สี่จังหวะ.....	4
รูปที่ 2.2	อัตราส่วนของส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงเทียบกับกำลังเครื่องยนต์.....	5
รูปที่ 2.3	ระบบไอดีสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา.....	6
รูปที่ 2.4	เรือนลิ้นเร่ง.....	7
รูปที่ 2.5	ขอบเขตการออกแบบคอคอดแบบ Throat venturi nozzle.....	8
รูปที่ 2.6	แสดงการออกแบบตัวจำกัดอากาศขนาด R3606.....	8
รูปที่ 2.7	เปรียบเทียบท่อตรงและปากแตร.....	10
รูปที่ 2.8	ลักษณะของปากแตรชนิดต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.9	ลักษณะบริเวณท่อร่วมไอดี.....	12
รูปที่ 2.10	ลักษณะความดันในท่อไอดี.....	12
รูปที่ 2.11	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเปรียบเทียบกับความเร็วของอากาศภายในท่อไอดี.....	13
รูปที่ 3.1	แนวโน้มของปริมาตรท่อพักอากาศที่มีผลต่อกำลังเครื่องยนต์.....	15
รูปที่ 3.2	ท่อพักอากาศสำหรับการทดลอง.....	15
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ของความยาวท่อร่วมไอดีและรอบเครื่องยนต์ที่ต้องการแรงบิดสูงสุด.....	16
รูปที่ 3.4	ท่อร่วมไอดีสำหรับการทดลอง.....	17
รูปที่ 4.1	แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองระบบไอดี.....	19
รูปที่ 4.2	ส่วนประกอบชุดทดลองระบบไอดี.....	19

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 หน่วยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม.....	20
รูปที่ 4.4 เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของมวลอากาศ.....	20
รูปที่ 4.5 เซ็นเซอร์วัดแรงดันสัมบูรณ์ในระบบไอดี.....	21
รูปที่ 4.6 เซ็นเซอร์วัดปริมาณออกซิเจนคงเหลือ.....	21
รูปที่ 4.7 อุปกรณ์บันทึกค่า.....	21
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของมวลอากาศ.....	22
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันสัมบูรณ์ในระบบไอดี.....	22
รูปที่ 4.10 ภาพรถแข่งสูตรนักศึกษาที่เตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบ.....	24
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเครื่องยนต์และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ที่ 6000RPM.....	25
รูปที่ 5.2 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเปรียบเทียบกับความเร็วของอากาศภายในท่อไอดี.....	26
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อไม่มีท่อพักอากาศ.....	26
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อมีท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตร.....	27
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวท่อร่วมไอดี 25.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ.....	28
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวท่อร่วมไอดี 35.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ.....	28

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะเวลาความยาวท่อร่วมไอดี 45.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ.....	29
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะเวลาความยาวท่อร่วมไอดี 55.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ.....	29
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อระยะเวลาความยาวท่อร่วมไอดี 25.5 เซนติเมตร โดยมีท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตร และ 6 ลิตร.....	30
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของแรงบิดของเครื่องยนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ.....	31
รูปที่ 5.11 แสดงความดันสัมบูรณ์และเวลาภายในระบบท่อไอดีของท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตร และความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร.....	31
รูปที่ 5.12 แสดงความดันสัมบูรณ์และเวลาภายในระบบท่อไอดีของท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตรและความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร.....	32
รูปที่ 5.13 แสดงเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความยาวท่อไอดีโดยมีท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตร.....	33
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตรโดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาความยาวท่อร่วมไอดี.....	33
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาความยาวท่อร่วมไอดี.....	34
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาความยาวท่อร่วมไอดี.....	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อ ท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตร โดยมีระยะความยาวท่อร่วมไอดี 25.5เซนติเมตร และ 55.5เซนติเมตร	35
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟแรงบิดของระบบไอดีแต่ละแบบ.....	36

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ SUZUKI LTR-450.....	14
ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบกรณีในการทดลอง.....	18
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงองศาการจู่ระเบิดก่อนศูนย์ตายบนที่ใช้ในทุกการทดสอบ.....	23

รายการสัญลักษณ์

ตัวอักษร

AF	ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
A	ค่าพื้นที่หน้าตัดของท่อร่วมไอดี
m	ค่ามวลของอากาศภายในท่อร่วมไอดี
L	ค่าความยาวของท่อร่วมไอดี
R	ค่ารัศมีหน้าตัดของท่อร่วมไอดี

ตัวอักษรกรีก

λ	ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเทียบเท่า
γ	ค่าอัตราส่วนของความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ต่อปริมาตรคงที่
ρ	ค่าความหนาแน่นของมวล
v	ค่าความเร็วเสียง

ตัวห้อย

m_{air}	ค่าอัตราการใช้มวลของเชื้อเพลิง
m_{fuel}	ค่าอัตราการใช้มวลของอากาศ
AF_{actual}	ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง
AF_{stoich}	ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในอุดมคติ
ω_H	ค่าความถี่สั่นพ้องเชิงมุม
P_0	ค่าความดันของอากาศขณะหยุดนิ่งในท่อร่วมไอดี
V_0	ค่าปริมาตรของท่อร่วมไอดีขณะหยุดนิ่ง
V_n	ค่าปริมาตรของอากาศภายในท่อร่วมไอดี
f_H	ค่าความถี่สั่นพ้อง

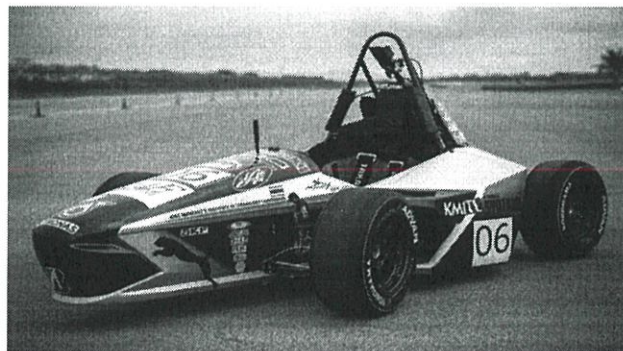
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

การแข่งขันรถแข่งสูตรนักศึกษา เป็นรายการแข่งขันที่ต้องการสมรรถนะของเครื่องยนต์เป็นอย่างมาก ซึ่งการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ในการแข่งขันมีปัจจัยอยู่หลายอย่าง อาทิเช่น ระบบท่อไอดี ระบบท่อไอเสีย ระบบวาล์ว แรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์ และระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม เป็นต้น ซึ่งผู้จัดทำมองเห็นว่า ระบบไอดีเป็นระบบที่มีนัยยะสำคัญมากเนื่องจากการจำกัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวควบคุมปริมาณอากาศ 20 มิลลิเมตรเข้าระบบไอดี และเป็นชิ้นส่วนที่อยู่ภายนอกของเครื่องยนต์ จึงเลือกศึกษาระบบท่อไอดีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

พลังงานทั้งหมดที่สร้างโดยเครื่องยนต์นั้นได้มาจากปริมาณสารตั้งต้นของเชื้อเพลิง โดยต้องเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง น้ำมันเชื้อเพลิง และ อากาศ โดยท่อไอดีที่ถูกออกแบบที่แตกต่างกันสามารถสร้างกำลังและให้เครื่องยนต์มีพฤติกรรมของกำลังแตกต่างกันของแต่ละรอบเครื่องยนต์ โดยความยาวของท่อไอดีจะให้กำลังเครื่องยนต์สูงสุด ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ค่าเดียว และปริมาตรของท่อพักอากาศที่แตกต่างกันก็ส่งผลกับปริมาณอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้และมีผลต่อกำลังของเครื่องยนต์เช่นกัน ในรูปแบบการแข่งขันรถแข่งสูตรนักศึกษา รายการ ออโต้ครอส และ เอ็นดูรานซ์ การทำงานของเครื่องยนต์ควรอยู่ในรอบเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเครื่องยนต์และกำลังที่เปลี่ยนแปลงไป ตามการเปลี่ยนแปลงของความยาวท่อไอดีและปริมาตรท่อพักอากาศของระบบท่อไอดี เพื่อนำไปสู่การออกแบบระบบท่อไอดีที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องยนต์ ยี่ห้อ ซูซูกิ รุ่น LTR-450 เพื่อใช้ในการแข่งขันรถแข่งสูตรนักศึกษา (Formula Student)



รูปที่ 1.1 รถแข่งสูตรนักศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อพฤติกรรมของเครื่องยนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อร่วมไอดีและปริมาตรของท่อพักอากาศต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์
- 1.2.2 เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบท่อไอดีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาเฉพาะพฤติกรรมของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนสี่จังหวะ สูบเดี่ยว ความจุ 450 ซีซี ยี่ห้อ SUZUKI รุ่น LTR-450 K6
- 1.3.2 ศึกษาผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อร่วมไอดี
- 1.3.3 ศึกษาผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของท่อพักอากาศ
- 1.3.4 ทำการออกแบบและสร้างชุดทดลองท่อพักอากาศและท่อร่วมไอดี
- 1.3.5 ทดสอบโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ อุปกรณ์วัดปริมาณการไหลของอากาศ และ อุปกรณ์วัดความดันสัมบูรณ์ในระบบท่อไอดี
- 1.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาความยาวของท่อร่วมไอดีและปริมาตรท่อพักอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไอดีของรถแข่งสูตรนักศึกษา

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาหาข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบท่อไอดี
- 1.4.2 วางขอบเขตในการศึกษาและตัวแปรในการทดสอบ
- 1.4.3 ออกแบบและประดิษฐ์ชุดทดลองระบบท่อไอดี
- 1.4.4 ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง
- 1.4.5 ประเมินผล วิเคราะห์ และสรุปผลการศึกษา

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถเข้าใจในหลักการและทฤษฎีของการออกแบบระบบท่อไอดี สำหรับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน สี่จังหวะ สูบเดี่ยว เพื่อใช้ในรถแข่งสูตรนักศึกษา
- 1.5.2 สามารถเข้าใจพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงของเครื่องยนต์จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเชิงปริมาตรของระบบท่อไอดี
- 1.5.3 สามารถเป็นแนวทางในการออกแบบระบบท่อไอดีสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

รถแข่งสูตรนักศึกษา คือ รถแข่งล้อเปิดความจุเครื่องยนต์ไม่เกิน 610 ซีซี ที่ทำการออกแบบโดยนักศึกษา ซึ่งมีข้อกำหนดในการออกแบบภายใต้กติกาของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ [1] เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการแข่งขัน ทั้งนี้ในการแข่งขันรถแข่งสูตรศึกษามีกติกาการออกแบบระบบไอดีซึ่งมีการจำกัดกำลังของเครื่องยนต์ โดยบังคับให้มีการติดตั้งตัวจำกัดอากาศ (Restrictor) ซึ่งมีลักษณะเป็นคอคอด และมีหน้าตัดเป็นวงกลมเพื่อจำกัดอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เครื่องยนต์ กติกากำหนดให้คอคอดต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในไม่เกิน 20 มิลลิเมตร

2.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สี่จังหวะ

เครื่องยนต์สี่จังหวะ[2] เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในรถยนต์ รถจักรยานยนต์ ซึ่งมีการเผาไหม้ภายในสำหรับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนนั้นไอของน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกอัดและจุดระเบิดโดยหัวเทียน โดยมีหลักการทำงานดังนี้

2.2.1 จังหวะดูด (Intake stroke)

ลูกสูบเคลื่อนที่จากจุดศูนย์ตายบน (Top dead center : TDC) ลงสู่จุดศูนย์ตายล่าง (Bottom dead center : BDC) ภายในกระบอกสูบ เมื่อลิ้นไอดีเปิดและลิ้นไอดีปิด จะเกิดความดันต่ำกว่าบรรยากาศภายนอกชั่วคราวส่งผลให้อากาศภายนอกไหลเข้าสู่ภายในห้องเผาไหม้อย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดสมดุล ในขณะที่อากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้นั้นได้มีการฉีดละอองน้ำมันเชื้อเพลิงจากหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Injector) เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (Air/Fuel mixture)

2.2.2 จังหวะอัด (Compression stroke)

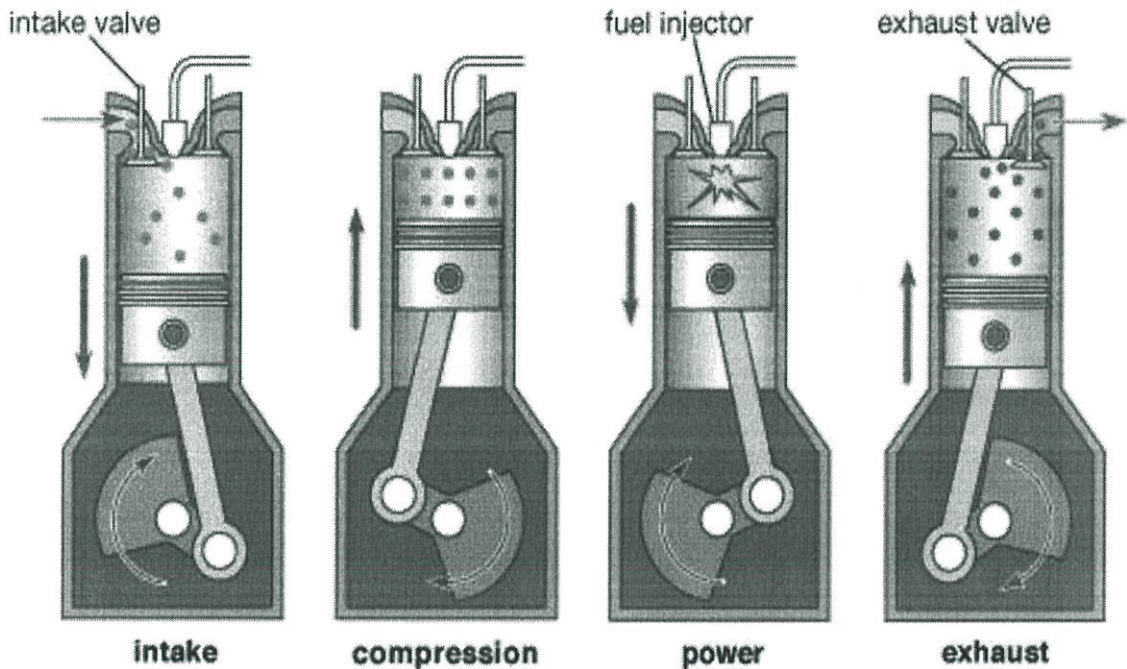
ลิ้นไอดีปิดและลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นทำให้เกิดการอัดตัวของส่วนผสมระหว่างอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้ภายในห้องเผาไหม้มีความดันและอุณหภูมิที่สูงพร้อมสำหรับการสันดาป

2.2.3 จังหวะระเบิด (Power stroke)

ก่อนลูกสูบจะเคลื่อนที่ถึงจุดศูนย์ตายบน เกิดการจุดระเบิด (Ignition) เพื่อสันดาปส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่ถูกอัด ส่งผลให้เกิดความดันสูงมากดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ลง ทำให้เพลาค้อเหวี่ยงเกิดการหมุน เป็นการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล

2.2.4 จังหวะคาย (Exhaust stroke)

เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ลงก่อนถึงจุดศูนย์ตายล่าง วาล์วไอเสียเปิดเพื่อคายไอเสียและลดความดันในห้องเผาไหม้ให้สมดุลกับความดันในระบบไอเสีย จากนั้นลูกสูบจึงเคลื่อนกลับขึ้นไปเพื่อผลักไอเสียที่เหลือออกไป หลังจากนั้นวาล์วไอเสียจะปิดและวาล์วไอดีเปิดเพื่อเริ่มการทำงานในวัฏจักรถัดไป



© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.

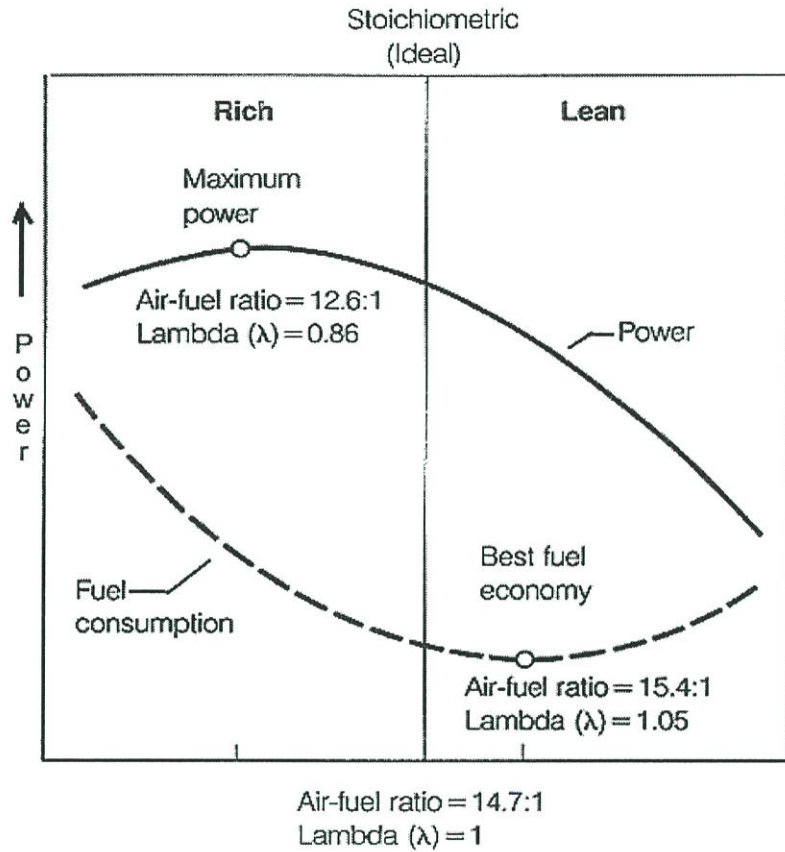
รูปที่ 2.1 การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน สี่จังหวะ [3]

สำหรับเครื่องยนต์สี่จังหวะความจุของเครื่องยนต์นั้นมีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ในหนึ่งวัฏจักร เพราะความจุเครื่องยนต์ที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้ส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงสามารถไหลบรรจุเข้าไปในเครื่องยนต์ได้มากยิ่งขึ้นเมื่อวาล์วไอดีเปิด การสันดาปส่วนผสมระหว่างอากาศ และเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้เกิดความดันที่ได้จากการเผาไหม้ที่สูงมากขึ้น จึงทำให้ได้กำลังของเครื่องยนต์มากขึ้น

2.3 อัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันเชื้อเพลิง

เนื่องจากเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีนสี่จังหวะ สูบเดี่ยว ขนาดความจุ 450 ซีซี ระบบหัวฉีด ซึ่งใช้หัวเทียนในการจุดระเบิดส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิง โดยที่ช่วงของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงนั้นจำกัดในช่วงแคบๆ ขึ้นกับเชื้อเพลิงและลักษณะเครื่องยนต์ เนื่องจากรถที่ใช้ในการทดสอบเป็นรถที่ใช้สำหรับการแข่งขันด้านสมรรถนะ ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-Fuel ratio : AF) ที่ให้กำลังสูงสุด ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad \text{---- (2.3.1) และ} \quad \lambda = \frac{AF_{actual}}{AF_{stoich}} \quad \text{---- (2.3.2)}$$

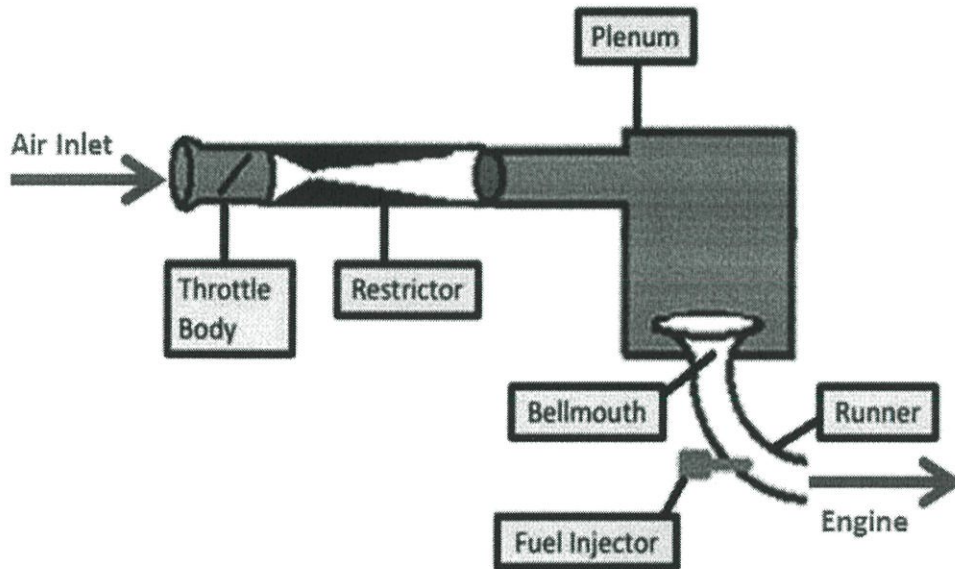


รูปที่ 2.2 อัตราส่วนของส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงเทียบกับกำลังเครื่องยนต์ [4]

จากรูปที่ 2.2 ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ (Lambda, λ) ที่ให้กำลังสูงสุดนั้น แนวน้ำมันของอัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันจะอยู่ในบริเวณที่น้ำมันหนากว่าค่าอัตราส่วนพอดีซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.6 หรืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์เท่ากับ 0.86 ซึ่งเราต้องหาค่าที่ให้กำลังสูงสุดสำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงคงที่ เนื่องจากเมื่อค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์คงที่ กำลังของเครื่องยนต์จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศที่ไหลเข้าไปสันดาปในเครื่องยนต์แต่ละรอบ ซึ่งถ้าอากาศไหลเข้าได้มากจึงทำการปรับปริมาณเชื้อเพลิงก็จะสามารถเพิ่มขึ้นมากตามและทำให้พลังงานที่ได้จากการจุดระเบิดแต่ละครั้งมากขึ้น เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงสามารถควบคุมได้จากกล่อง ECU (Electronic Control Unit) แต่ปริมาณอากาศที่ไหลเข้าขณะเปิดลิ้นเร่งสุดนั้นถูกจำกัดด้วยลักษณะของระบบท่อไอดี ดังนั้นหากสามารถออกแบบระบบท่อไอดีให้สามารถนำอากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้มากก็จะทำให้ได้กำลังเครื่องยนต์ที่มากตาม

2.4 ระบบไอดี

ระบบไอดีทำหน้าที่นำพาส่วนผสมน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศให้มีอัตราส่วนพอเหมาะแล้วดูดเข้าไปในกระบอกสูบ เนื่องจากการที่จะทำให้เครื่องยนต์มีกำลังเครื่องยนต์สูงๆได้นั้น ระบบไอดีมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเงื่อนไขในการทำให้เครื่องยนต์มีกำลังมากขึ้นนั้น ต้องคำนึงถึงการไหลที่สะดวกและปริมาณอากาศที่เหมาะสม รถแข่งสูตรนักศึกษาที่ใช้ในการแข่งขันประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆดังนี้

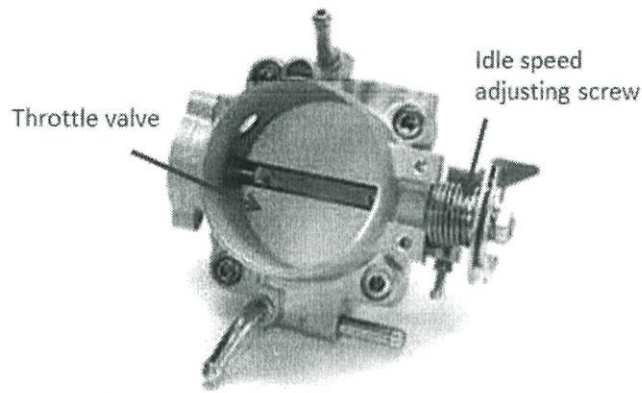


รูปที่ 2.3 ระบบไอดีสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

- เรือนลิ้นเร่ง (Throttle Body)
- ตัวจำกัดอากาศ (Restrictor)
- ท่อพักอากาศ (Plenum)
- ปากแตร (Bellmouth)
- ท่อร่วมไอดี (Runner)

2.4.1 เรือนลิ้นเร่ง (Throttle Body)

เรือนลิ้นเร่ง[5] ประกอบด้วยลิ้นเร่ง เซนเซอร์ตำแหน่งลิ้นเร่ง ลิ้นควบคุมเดินเบาที่รอบสูง สวิตช์ตำแหน่งเดินเบา อุปกรณ์ทั้งหมดถูกติดตั้งอยู่ภายในเรือนลิ้นเร่ง โดยทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการไหลของอากาศที่เข้าสู่เครื่องยนต์



รูปที่ 2.4 เรือนลิ้นเร่ง [6]

2.4.2.1 ลิ้นเร่ง (Throttle valve)

มีหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบ ซึ่งจะเป็นการควบคุมความเร็วของเครื่องยนต์เหมือนกับลิ้นเร่งของคาร์บูเรเตอร์

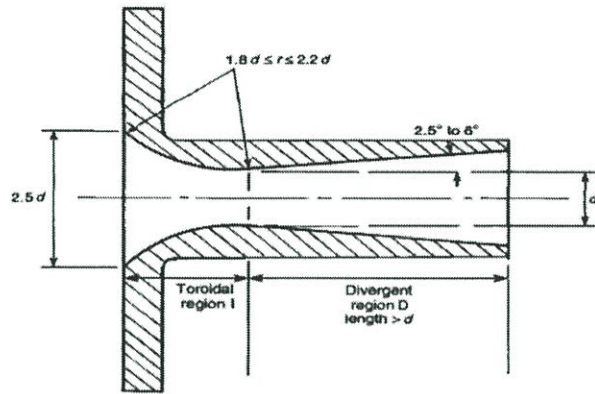
2.4.2.2 สกรูปรับแต่งรอบเดินเบา (Idle speed adjusting screw)

ทำหน้าที่เปิดให้อากาศไหลเข้ากระบอกสูบโดยไม่ต้องผ่านลิ้นเร่งเนื่องจากขณะเดินเบาเครื่องยนต์ ลิ้นเร่งปิดทำให้ท่อร่วมไอดีเกิดสุญญากาศอาจทำให้เครื่องยนต์ดับได้ จึงจำเป็นต้องมีช่องทางพิเศษให้อากาศไหลผ่านเข้ากระบอกสูบ เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถเดินเบาอยู่ได้โดยไม่ต้องดับ หากสกรูเปิดให้อากาศไหลผ่านได้มากความเร็วรอบเดินเบาก็จะสูงขึ้น และในทางตรงกันข้าม ถ้าสกรูเปิดให้อากาศไหลผ่านได้น้อยความเร็วรอบเดินเบาจะลดลง

2.4.2 ตัวจำกัดอากาศ (Restrictor)

ตัวจำกัดอากาศ [7] นี้มีลักษณะเป็นคอคอดเพื่อช่วยจำกัดอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ มีหน้าตัดเป็นวงกลมโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 20 มิลลิเมตร ลำดับการติดตั้งจะต้องอยู่ระหว่างลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle) และเครื่องยนต์ ซึ่งหมายความว่าห้ามมีลิ้นปีกผีเสื้ออยู่ด้านหลังของตัวจำกัดอากาศจากรูปที่ 2.3 ตัวจำกัดอากาศคือชิ้นส่วนที่ 2 จากทางซ้ายของภาพถัดจากลิ้นเร่งและก่อนท่อพักอากาศ

การออกแบบตัวจำกัดอากาศ ใช้ทฤษฎีในการออกแบบของคู่มือการออกแบบเครื่องมือวัดการไหล FLOW MEASUREMENT HANDBOOK [8] เนื่องจากเครื่องมือวัดเป็นอุปกรณ์ที่รบกวนระบบการไหลน้อยที่สุด โดยเลือกใช้ Venturi nozzle แบบ Throat venturi nozzle ซึ่งเป็นส่วนของเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับการไหล ของไหลที่มีความเร็วสูงผ่านท่อบีบอัด (Nozzle) มีขอบเขตของการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 2.5



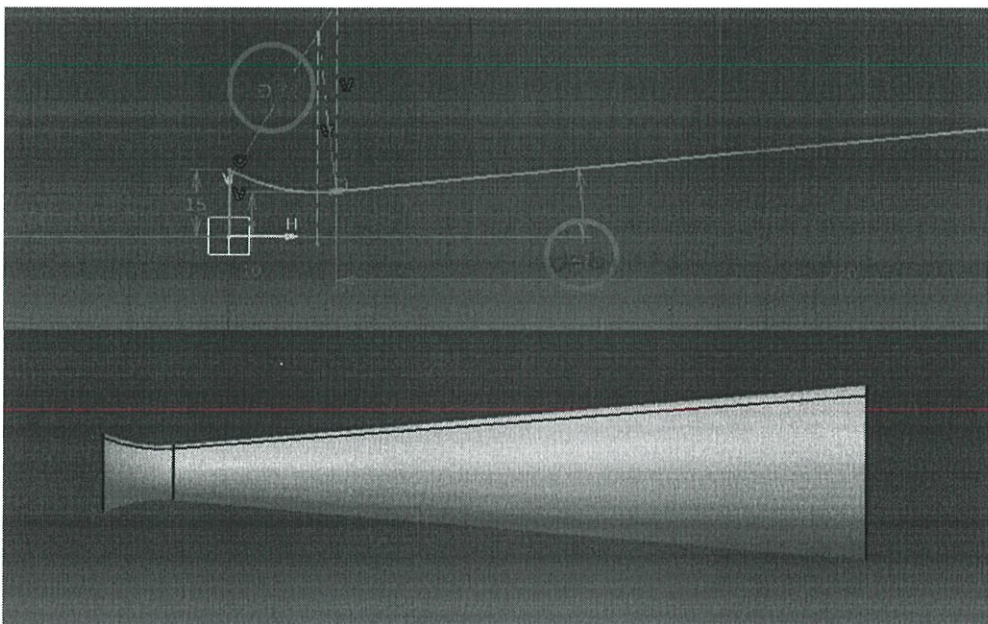
รูปที่ 2.5 ขอบเขตการออกแบบคอคอดแบบ Throat venturi nozzle [8]

โดยขอบเขตการออกแบบให้ความสำคัญกับ 2 ส่วนคือ

2.4.2.1 รัศมีส่วนโค้งทางเข้า โดยให้เส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนที่เล็กที่สุดของคอคอดเป็น d และให้รัศมีของส่วนโค้งทางเข้าเป็น r จากขอบเขตการออกแบบจะได้ว่า $1.8d \leq r \leq 2.2d$

2.4.2.2 องศาออกที่ทางออกของคอคอด สำหรับคอคอดแบบ Throat venturi nozzle ต้องมีองศาออกที่ทางออกอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 6 องศา

ทั้งนี้ได้เลือกใช้ตัวจำกัดอากาศซึ่งเป็นผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา การศึกษาและพัฒนาที่ร่วมมือดีสำหรับบรรดาสตูดนต์ศึกษา [7] ที่สามารถให้อัตราการไหลของอากาศสูงที่สุดบริเวณคอคอด คือ ตัวจำกัดอากาศที่มี รัศมีส่วนโค้งทางเข้า 36 มิลลิเมตร และองศาทางออก 6 องศาโดยเริ่มจากจุดคอคอด (R36,θ6) ซึ่งมีความเร็วการไหลสูงที่สุดที่คอคอด 171.87 เมตรต่อวินาที ในรถแข่งสตูร์นต์ศึกษา



รูปที่ 2.6 แสดงการออกแบบตัวจำกัดอากาศขนาด R36θ6 [7]

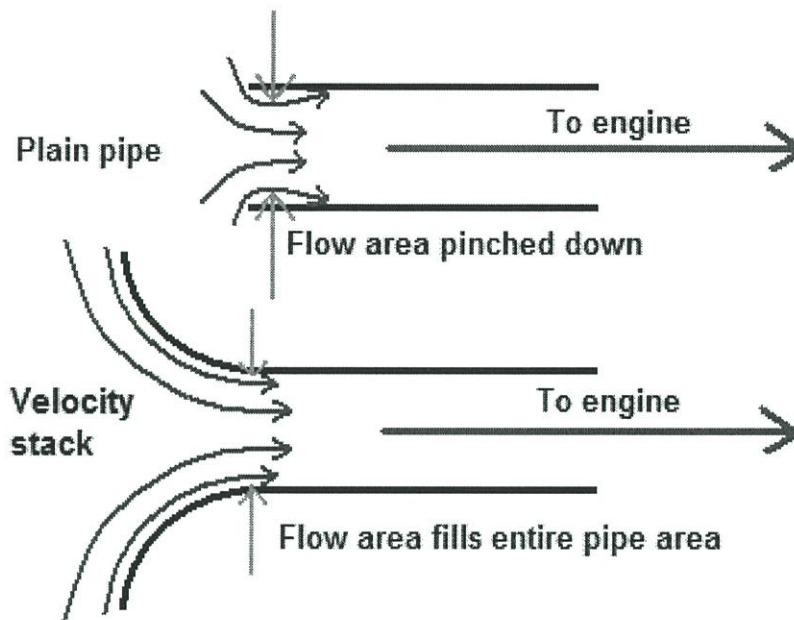
2.4.3 ท่อพักอากาศ (Plenum)

ท่อพักอากาศจะช่วยลดคลื่นกระแทกจากแรงดูดของช่องไอตีของลูกสูบ ซึ่งปกติแล้วเครื่องยนต์สี่สูบแถวเรียงทั่วไปมีจังหวะจุดระเบิดเรียงตามสูบ 1-3-4-2 ดังนั้นเมื่อมีการดูดในท่อร่วมไอตีแบบลิ้นเดี่ยวหรือหลายลิ้นที่มีปากทางเข้าไอตีรวมกันเป็น 1 ช่อง จะมีการสลับกันดูดตามตำแหน่งจังหวะจุดระเบิด จึงทำให้เกิดการควมถี่ในท่อร่วมไอตีได้ จึงต้องมีห้องพักอากาศที่มีอากาศจำนวนมากสะสมไว้เพื่อให้เพียงพอต่อการดูดในจังหวะต่อไปของสูบถัดไป

การออกแบบท่อพักอากาศนั้น มี 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ปริมาตร (Volume) และรูปร่าง (Shape) อ้างอิงตามบทความ Intake Manifold Design & Testing [9] สำหรับเครื่องยนต์สี่สูบนั้นท่อพักอากาศต้องสามารถกระจายอากาศให้ไหลเข้าเท่าๆกันทุกสูบและไม่ส่งผลกระทบต่อความไวในการตอบสนองของรอบเครื่องยนต์ ถ้าท่อพักอากาศมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เครื่องยนต์ตอบสนองต่อลิ้นเร่งช้าเพราะเนื่องจากต้องใช้แรง (Forced induction) มาก และปริมาตรของท่อพักอากาศขนาดไม่ควรเกิน 1.5 ถึง 2 เท่าของปริมาตรเครื่องยนต์ (Volume displacement)

2.4.4 ปากแตร (Bellmouth)

ปากแตรทำหน้าที่ชักนำอากาศที่ปากทางเข้าท่อไอตีให้เข้ามาในท่อไอตีได้ง่ายขึ้น เนื่องจากปกติแล้วเมื่ออากาศไหลเข้ามาทางปากท่อไอตีมักจะไหลเข้าไปชนกับเหลี่ยมปากทางเข้า ซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศที่ปากทางเข้า ส่งผลให้การไหลไม่ราบเรียบ เครื่องยนต์ที่ติดตั้งปากแตรที่ปากทางเข้าไอนั้น เมื่อคิดความยาวของท่อไอตีต้องรวมไปถึงปลายทางเข้าปากแตรด้วย ดังนั้นความยาวของปากแตรจึงมีผลโดยตรงกับพฤติกรรมของเครื่องเช่นเดียวกับท่อร่วมไอตีคือ ยิ่งยาวยิ่งทำให้ความเร็วของอากาศสูง มีการตอบสนองดีในรอบต่ำแต่จะไหลไม่สะดวกในรอบสูง แต่ถ้าปากแตรสั้นทำให้ความเร็วของอากาศน้อยในรอบต่ำแต่จะไหลดีในรอบสูง



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบท่อตรงและปากแคบ
บน : ท่อตรงที่ไม่มีปากแคบ ล่าง : ท่อที่มีปากแคบ [10]

การออกแบบปากแคบ อ้างอิงตามทฤษฎีในบทความ Best Bell (Design of intake manifold bellmouth) [11] โดยในบทความได้มีการทดลองและออกแบบปากทางเข้าท่ออากาศ เปรียบเทียบกัน 3 แบบ คือ

2.4.4.1 แบบท่อตรงธรรมดา (Plain Pipe)

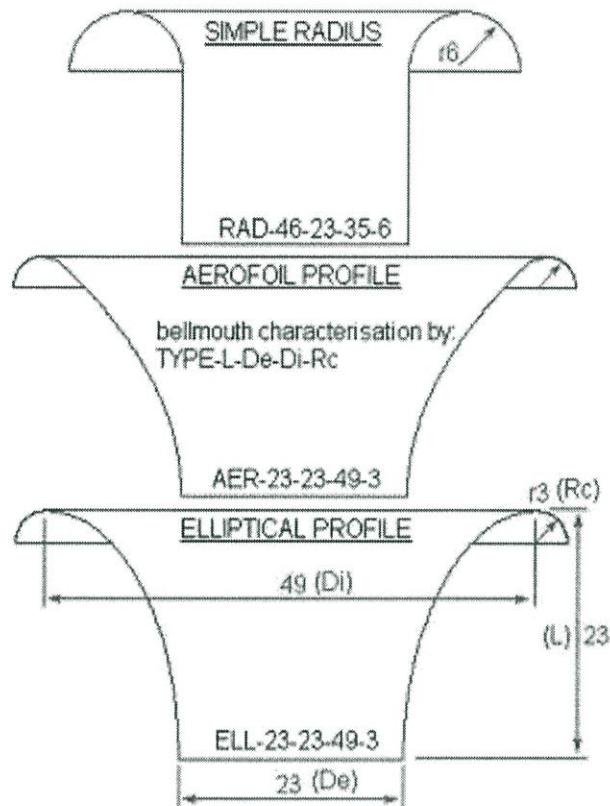
มีลักษณะทางเข้าเป็นท่อตรงธรรมดาไม่มีส่วนโค้งบริเวณทางเข้า ซึ่งในการทดลองเลือกใช้ท่อแบบนี้เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่าย

2.4.4.2 แบบส่วนโค้งอย่างง่าย (Simple Radius)

ที่ทางเข้ามีส่วนโค้งรัศมีคงที่เฉพาะปากทางเข้า

2.4.4.3 แบบส่วนโค้งวงรี (Elliptical profile)

มีส่วนโค้งที่ทางออกเป็นส่วนโค้งไม่สม่ำเสมอคล้ายวงรี



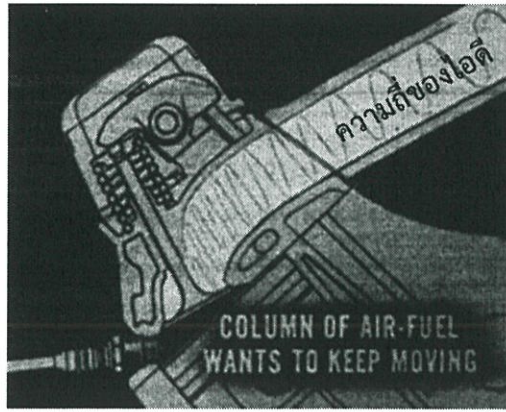
รูปที่ 2.8 ลักษณะของปากแตรชนิดต่างๆ

บน : ส่วนโค้งแบบธรรมดา กลาง : ส่วนโค้งอย่างง่าย ล่าง : ส่วนโค้งวงรี [11]

2.4.5 ท่อร่วมไอดี (Runner)

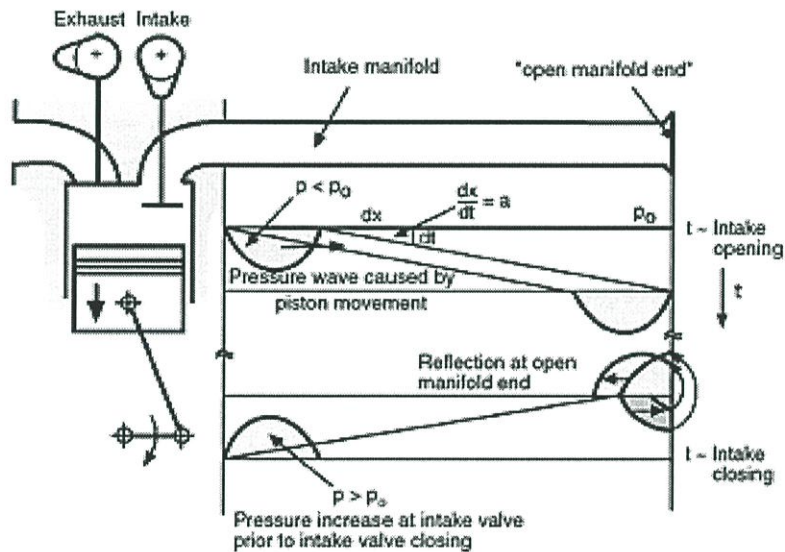
หน้าที่ของท่อร่วมไอดี คือการนำอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงเพื่อนำไปเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของกระบอกสูบตามจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อที่จะลำเลียงอากาศที่ผ่านการกรองทำความสะอาดแล้วเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เนื่องจากระบบเครื่องยนต์แต่ละรุ่น มีการออกแบบที่แตกต่างกันไป ท่อร่วมไอดี จึงมีลักษณะแตกต่างกันไป ตามแต่ละเครื่องยนต์ด้วย ท่อร่วมไอดีจะติดตั้งประกบเข้ากับทางเข้าไอดีที่ฝาสูบ (Cylinder head) ซึ่งอีกด้านหนึ่ง จะติดตั้งร่วมกับคาร์บูเรเตอร์ หรือระบบหัวฉีด (Fuel Injector) ในเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบหัวฉีด

จากทฤษฎี Helmholtz Resonance ได้อธิบายการไหลของอากาศเนื่องจากการเปิดปิดของวาล์วไอดีว่าอากาศจะมีลักษณะเป็นการไหลที่สามารถถูกบีบอัดได้ และอากาศไหลเป็นความถี่



รูปที่ 2.9 ลักษณะบริเวณท่อร่วมไอดี [12]

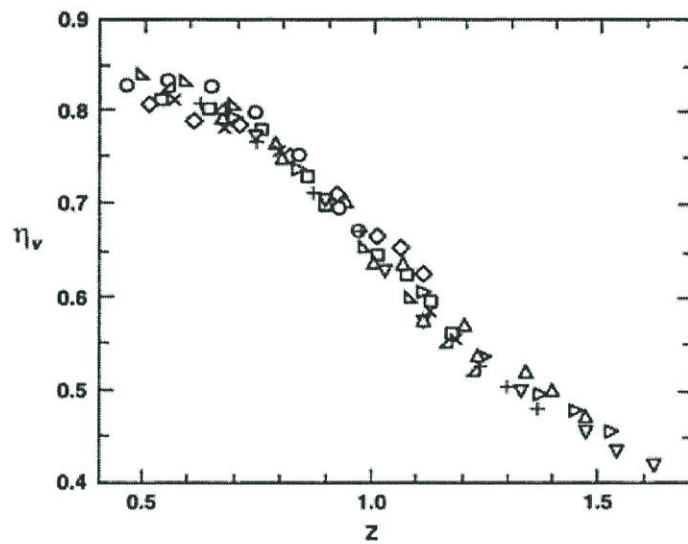
อากาศที่ไหลเข้าวาล์วในขณะที่วาล์วเปิดนั้นมีความดันมากกว่า 1 บรรยากาศในช่วงสั้นๆของความถี่ของอากาศตามรอบเครื่องยนต์



รูปที่ 2.10 ลักษณะความดันในท่อไอดี [13]

จากรูปที่ 2.10 เมื่อวาล์วเปิด (Intake opening) ความดันบริเวณหน้าวาล์วจะลดลงและวิ่งออกไปบริเวณท่อพักอากาศแล้วสะท้อนกลับมาเป็นความดันที่มากกว่าความดันบรรยากาศ หากมีการออกแบบที่เหมาะสม ในจังหวะที่อากาศในท่อบีบอัดตัวและมีความดันมากกว่า 1 บรรยากาศและวาล์วไอดีเปิดพอดีในเวลาเดียวกันจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางปริมาตรของการดูดเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นความยาวท่อไอดีจึงมีผลกับความถี่ของอากาศและสามารถทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดได้โดยที่ท่อไอดีที่สั้นจะให้แรงบิดสูงสุดในรอบสูงแต่ท่อไอดีที่ยาวจะให้แรงบิดสูงสุดที่รอบต่ำ

2.5 ผลของความเร็วอากาศต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาตร



รูปที่ 2.11 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเปรียบเทียบกับความเร็วของอากาศภายในท่อไอดี [14]

จากรูปที่ 2.11 พบว่าเมื่ออากาศที่ไหลภายในท่อไอดีมีความเร็วมากกว่า 0.5 เท่าของความเร็วเสียงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของระบบไอดีลดลงตามไปด้วยเพราะนั่นคือรูปแบบระบบให้ความเร็วสูงสุดของอากาศในระบบไม่เกิน 0.5 เท่าของความเร็วเสียง

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 บทนำ

จากขอบเขตการศึกษางานวิจัยนี้ เน้นการศึกษาพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของท่อพักอากาศและระยะความยาวของท่อร่วมไอดี จึงต้องมีการกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรควบคุมให้เหมาะสมกับรถแข่งสูตรนักศึกษาโดยใช้เครื่องยนต์ SUZUKI LTR-450 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์สี่จังหวะ สูบเดี่ยว ในงานวิจัยเนื่องจากมีน้ำหนักของเครื่องยนต์เบากว่าเครื่องยนต์สี่สูบจึงส่งผลให้โหลดที่กระทำต่อเครื่องยนต์ลดลงและสามารถประหยัดน้ำมันได้มากขึ้น

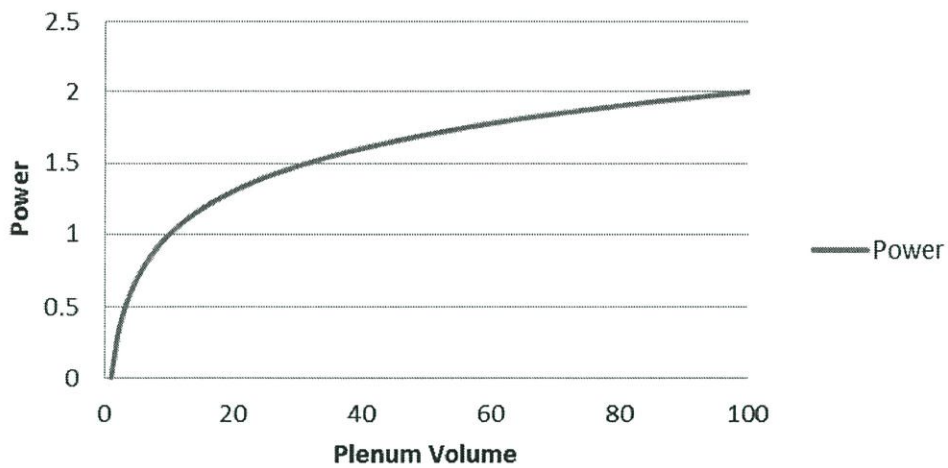
Manufacturer	Suzuki®
Displacement	450 cc
Type	4-Stroke, Single cylinder
Cooling	Liquid-cooled
Valve Train	DOHC, 4-valve single
Bore/Stroke	95.5 mm x 62.8 mm
Compression Ratio	11.7: 1
Fuel System	Fuel Injection
Lubricant	Semi-Drysump
Transmission	5-speed sequential

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ SUZUKI LTR-450

3.2 การออกแบบท่อพักอากาศ

เนื่องจากท่อพักอากาศไม่มีทฤษฎีการออกแบบที่แน่นอนซึ่งแนวโน้มตามปกตินั้นเมื่อปริมาตรภายในท่อพักอากาศมากจะทำให้ได้กำลังที่มากขึ้นแบบลอการิทึมดังรูปที่ 3.2 โดยปกติของเครื่องยนต์แบบ 4 สูบแถวเรียงนั้นปริมาตรแนะนำของท่อพักอากาศนั้นจะอยู่ที่ 1.5 ถึง 2 เท่าของปริมาตรเครื่องยนต์สำหรับระบบไอดีไม่มีตัวจำกัดอากาศแต่สำหรับเครื่องยนต์สูบเดี่ยวแบบมีตัวจำกัดอากาศนั้นไม่สามารถหาแหล่งข้อมูลอ้างอิงได้ว่าปริมาตรของท่อพักอากาศที่เหมาะสมนั้นควรเป็นเท่าไรจึงได้จัดทำชุดทดลองที่สามารถปรับเปลี่ยนปริมาตรของท่อพักอากาศเพื่อใช้ในการศึกษาและทดลอง

Plenum trend



รูปที่ 3.1 แนวโน้มของปริมาณท่อพักอากาศที่มีผลต่อกำลังเครื่องยนต์



รูปที่ 3.2 ท่อพักอากาศสำหรับการทดลอง

ผู้จัดทำได้เลือกปริมาณท่อพักอากาศทั้งหมด 5 ขนาดประกอบด้วย ไม่มีท่อพักอากาศ, 1.5 ลิตร (ประมาณ 3 เท่าของปริมาตรเครื่องยนต์), 3 ลิตร (ประมาณ 6 เท่าของปริมาตรเครื่องยนต์), 4.5 ลิตร (ประมาณ 10 เท่าของปริมาตรเครื่องยนต์) และ 6 ลิตร (ประมาณ 13 เท่าของปริมาตรเครื่องยนต์) สร้างโดยใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วเป็นส่วนกึ่งกลางในรูปที่ 3.3 และปรับเปลี่ยนความยาวขึ้นนี้เพื่อเปลี่ยนปริมาตรตามความต้องการ และใช้ฝาท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เจาะรูตรงกลางเพื่อฝังจุดยึดตัวจำกัดอากาศและปากแตรสำหรับการประกอบท่อพร้อมไอดี

3.3 การออกแบบท่อร่วมไอดี

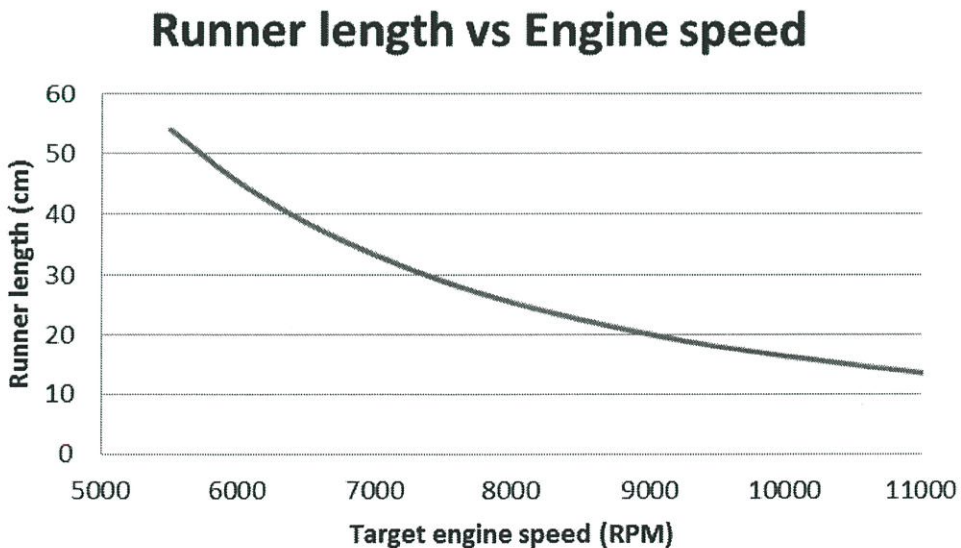
การออกแบบท่อร่วมไอดี [15] นั้นได้เริ่มต้นจากการใช้สมการการสั่นพ้องของ Helmholtz ดังสมการที่ 3.3.1 โดยคำนวณระยะความยาวของท่อร่วมไอดีที่คาดว่าจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง เพื่อทดสอบว่าสมการดังกล่าวเป็นจริงหรือไม่เนื่องจากวิธีการคำนวณนั้นมีได้หลายวิธีเช่น จากการใช้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ต้องการแรงบิดสูงสุด, ความเร็วเสียงของอากาศ ณ อุณหภูมิอากาศบริเวณท่อร่วมไอดีและองศาของแคมลูกเบี้ยวฝั่งไอดีมาใช้คำนวณหาคาบการดูดอากาศแล้วนำมาใช้หาระยะความยาวท่อร่วมไอดี แต่จากข้อมูลวิจัยต่าง ๆ นั้นเลือกที่จะใช้สมการของ Helmholtz ในการคำนวณทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้สมการดังกล่าว

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L}} \quad \text{---- (3.3.1)}$$

ค่าคงที่ในการคำนวณ $A =$ พื้นที่หน้าตัดท่อร่วมไอดี
 $= 0.001590 \text{ m}^2$

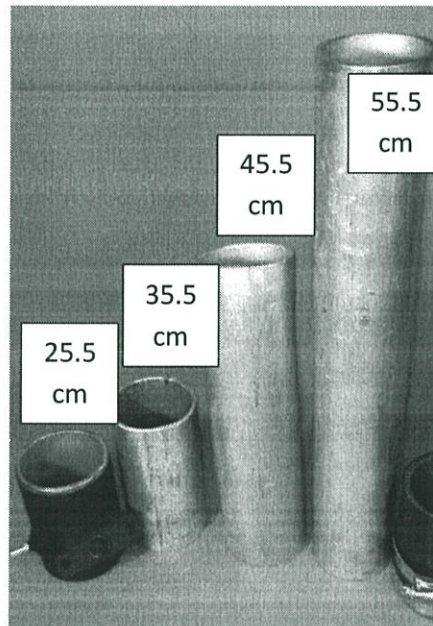
$v = 346.65 \text{ m/s}$ ที่ 25°C

$V_0 = V_c + (V_d/2)$
 $= 42 + (450/2)$
 $= 267 \text{ cm}^3$



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของความยาวท่อร่วมไอดีและรอบเครื่องยนต์ที่ต้องการแรงบิดสูงสุด

จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าระยะความยาวท่อร่วมไอดีแปรผกผันกับรอบเครื่องยนต์ที่ต้องการแรงบิดสูงสุด จากสถิติการใช้งานเครื่องยนต์ในการแข่งขันที่ผ่านมาพบว่ารอบเครื่องยนต์ที่ต้องการกำลังนั้นจะอยู่ช่วง 5000-8000 รอบต่อนาที ผู้จัดทำจึงได้เลือกระยะความยาวท่อร่วมไอดีมาทดสอบทั้งหมด 4ค่าได้แก่ 25.5, 35.5, 45.5 และ55.5 เซนติเมตร ซึ่งจะได้ความเร็วรอบที่ต้องการแรงบิดสูงสุดที่8000, 6800, 6000 และ5400 รอบต่อนาที ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ท่อร่วมไอดีสำหรับการทดลอง

บทที่ 4

อุปกรณ์ทดลองและวิธีการทดลอง

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีการกำหนดตัวแปรควบคุม คือ ชนิดน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel) การตั้งองศาการจุดระเบิด (Ignition timing) และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ (Lambda) และตัวแปรต้น คือ ปริมาตรของท่อพักอากาศ และระยะความยาวของท่อร่วมไอดี ทั้งนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบท่อไอดีสำหรับรถแข่ง สูตรนักศึกษาในอนาคต

4.2 รายละเอียดการทดลอง

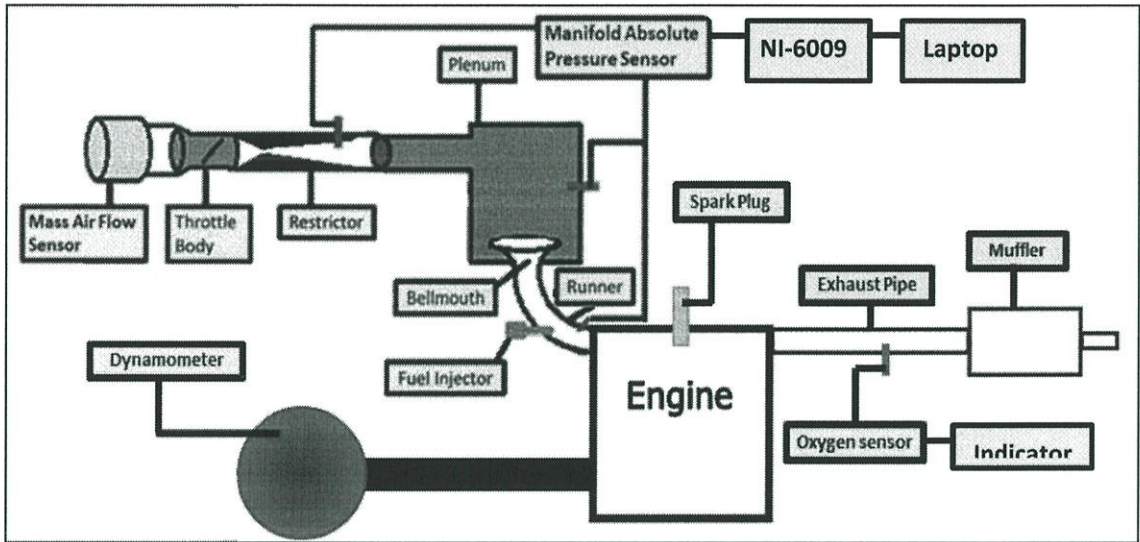
ทำการศึกษาโดยการปรับเปลี่ยนระยะความยาวของท่อร่วมไอดี 4 ค่า ได้แก่ 25.5cm, 35.5cm, 45.5cm และ 55.5cm และปริมาตรของท่อพักอากาศ 5 ค่า ได้แก่ ไม่มีท่อพักอากาศ, 1.5L, 3L, 4.5L และ 5L รวมทำการทดลองทั้งหมด 20 กรณี

Test		Plenum volume (Litre)				
		0	1.5	3	4.5	6
Runner length (cm)	25.5					
	35.5					
	45.5					
	55.5					

Test		Plenum volume (Litre)
		0
Runner length (cm)	19.5	
	29.5	
	39.5	
	49.5	

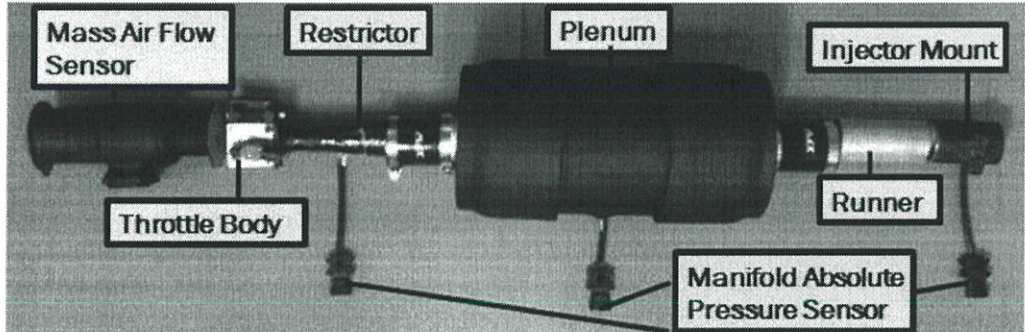
ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบกรณีในการทดลอง

4.3 อุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 4.1 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองระบบไอดี

4.3.1 ชุดทดลองระบบไอดี



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบชุดทดลองระบบไอดี

1. เรือนลิ้นเร่ง (Throttle body)
2. ตัวจำกัดอากาศ (Restrictor)
3. ท่อพักอากาศ (Plenum)
4. ปากแตร (Bellmouth)
5. ท่อร่วมไอดี (Runner)
6. จุดยึดหัวฉีด (Injector mount)

4.3.2 เครื่องยนต์ SUZUKI LTR-450 K6

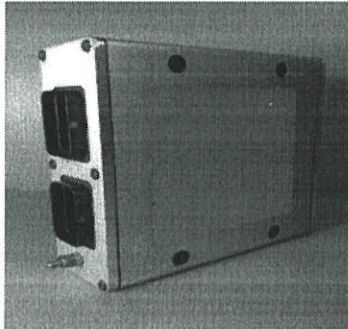
4.3.3 ระบบไอเสีย

- ท่อไอเสีย (Exhaust pipe)
- หม้อพักไอเสีย (Muffler)

4.3.4 รถแข่งสูตรนักศึกษา

4.3.5 น้ำมันเชื้อเพลิง Gasohol E10 (Octane 95)

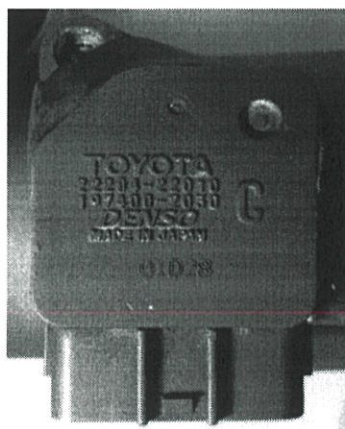
4.3.6 หน่วยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม (Electrical Control Unit : ECU)



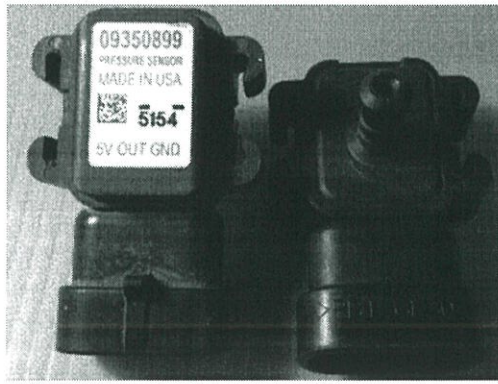
รูปที่ 4.3 หน่วยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม DTAfast S60 PRO

4.4 เครื่องมือวัดและเครื่องมือบันทึกผลการทดลอง

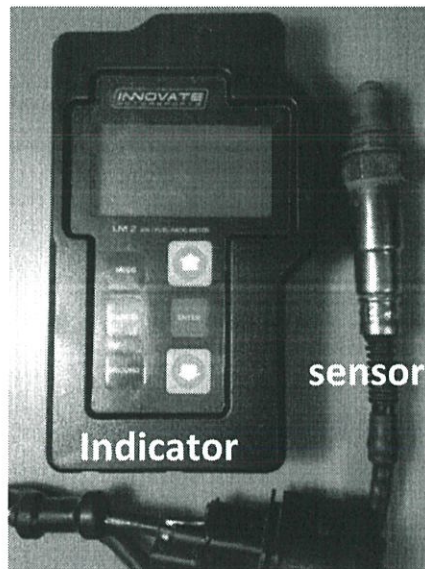
- 4.4.1 เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของมวลอากาศ (Mass air flow sensor)
- 4.4.2 เซ็นเซอร์วัดความดันสัมบูรณ์ในระบบไอดี (Manifold absolute pressure sensor)
- 4.4.3 เซ็นเซอร์วัดปริมาณออกซิเจนคงเหลือ (Oxygen sensor)
- 4.4.4 อุปกรณ์บันทึกค่า (Data logger)
- 4.4.5 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)



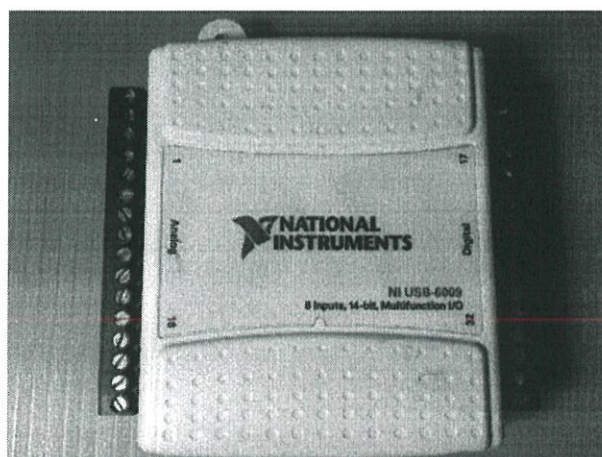
รูปที่ 4.4 เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของมวลอากาศ
(Mass air flow sensor) จากเครื่องยนต์Toyota 3ZZ-FE



รูปที่ 4.5 เซ็นเซอร์วัดแรงดันสัมบูรณ์ในระบบไอดี
(Manifold absolute pressure sensor) 09350899 ของGeneral motor



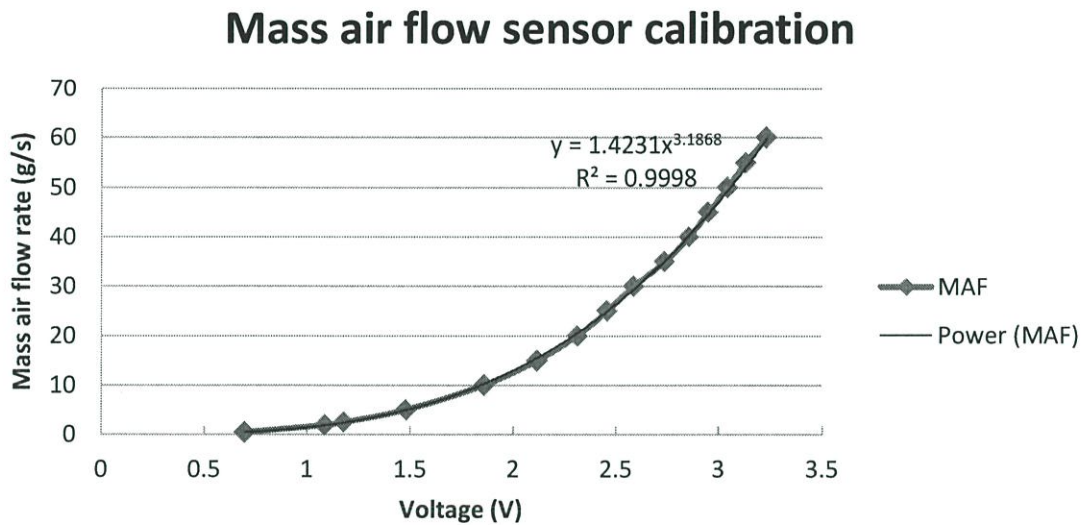
รูปที่ 4.6 เซ็นเซอร์วัดปริมาณออกซิเจนคงเหลือ (Oxygen sensor) Innovate LM2



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์บันทึกค่า (Data logger) National Instruments NI USB-6009

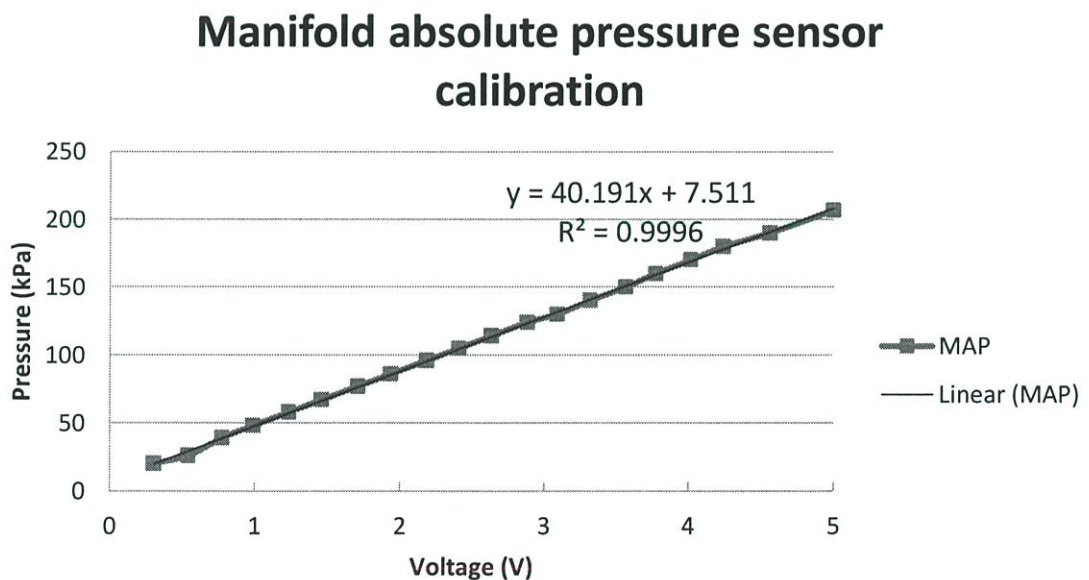
4.5 การสอบเทียบเครื่องมือวัด

4.5.1 เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของมวลอากาศ (Mass air flow sensor)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของมวลอากาศ

4.5.2 เซ็นเซอร์วัดแรงดันสัมบูรณ์ในระบบไอดี (Manifold absolute pressure sensor)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันสัมบูรณ์ในระบบไอดี

4.5.3 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

สอบเทียบโดยการเทียบค่าจากการนำรถแข่งสูตรนักศึกษาไปทดสอบวัดกำลังจากศูนย์บริการภายนอกสถาบัน 3 แห่ง แล้วจึงนำค่าที่ได้มาเทียบกับไดนาโมมิเตอร์ที่ห้องปฏิบัติการยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พบว่าถ้าหากนำ 2.5 คูณด้วยค่ากำลังหน่วยเป็น กิโลวัตต์ (kW) ที่แสดงบนอุปกรณ์จะได้กำลังหน่วยเป็นแรงม้า (Hp) ที่ถูกต้อง

4.6 ขั้นตอนการเตรียมชุดทดลอง

4.6.1 เตรียมรถขึ้นไดนาโมมิเตอร์

4.6.2 ประกอบระบบท่อไอเสียและเครื่องมือวัดต่างๆ

4.6.3 สอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆ

4.6.4 เลือกค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์ ที่ให้กำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ ซึ่งพบว่ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.81 โดยนำค่านี้ไปใช้ในทุกระดับขั้นตอนการทดสอบ

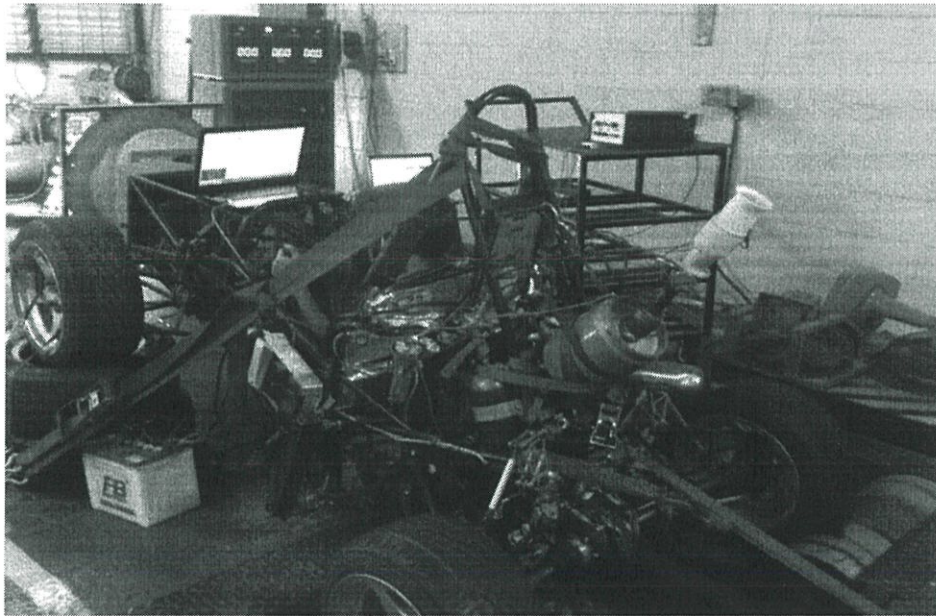
4.6.5 เลือกองศาการจุดระเบิด (Ignition timing) โดยอ้างอิงจากค่าที่ใช้ในการแข่งขัน

TSAE AUTO CHALLENGE 2013-14

RPM	Ignition timing(CA BTDC)
1500	22
2000	40
2500	40.8
3000	40.9
3500	43.1
4000	43.5
4500	44.1
5000	44.5
5500	45
6000	46.1
6500	46.6
7000	47
7500	47
8000	47
8500	47

RPM	Ignition timing(CA BTDC)
9000	47
9500	47
10000	47
10500	47

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงองศาการจุดระเบิดก่อนศูนย์ตายบนที่ใช้ในทุกการทดสอบ



รูปที่ 4.10 ภาพรถแข่งสูตรนักศึกษาที่เตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบ

4.7 ขั้นตอนการทดลอง

4.7.1 สตาร์ทเครื่องยนต์

4.7.2 ทำการปรับค่าการฉีดน้ำมันเพื่อควบคุมค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ ให้มีค่าเท่ากับ 0.81 ทุกความเร็วรอบที่การเปิดลิ้นเร่ง 100%

4.7.3 บันทึกค่ากำลังและแรงบิดในแต่ละความเร็วรอบเครื่องยนต์

4.7.4 ปรับไดนามิเตอร์เป็นโหมตควบคุมความเร็วแล้วบันทึกค่าความดันสัมบูรณ์ที่ความเร็วรอบ 4000, 6000 และ 8000 รอบต่อนาที ณ ตำแหน่งต่างๆในระบบไอดีที่ความถี่ 2000 Hz

4.7.5 เปลี่ยนความยาวของท่อร่วมไอดี ทำขั้นตอนที่ 1-4 ซ้ำ จนครบทุกความยาวที่กำหนด

4.7.6 เปลี่ยนปริมาตรของท่อพักอากาศ ทำขั้นตอนที่ 1-5 ซ้ำ จนครบทุกปริมาตรที่กำหนด

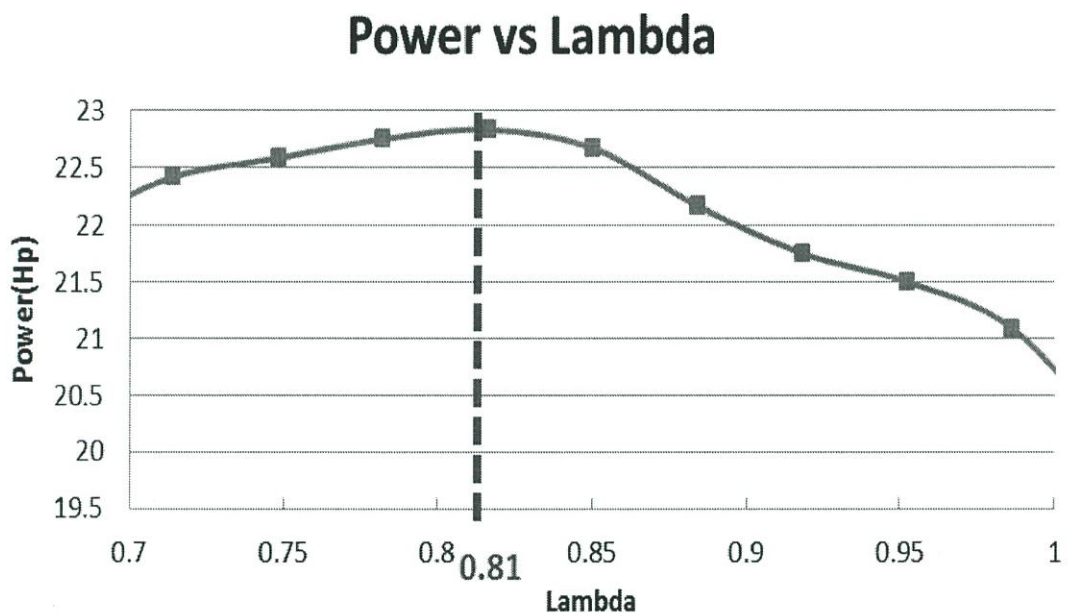
4.7.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

5.1 ผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์

จากการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์ที่ให้กำลังสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 0.81 ตามรูปที่ 5.1

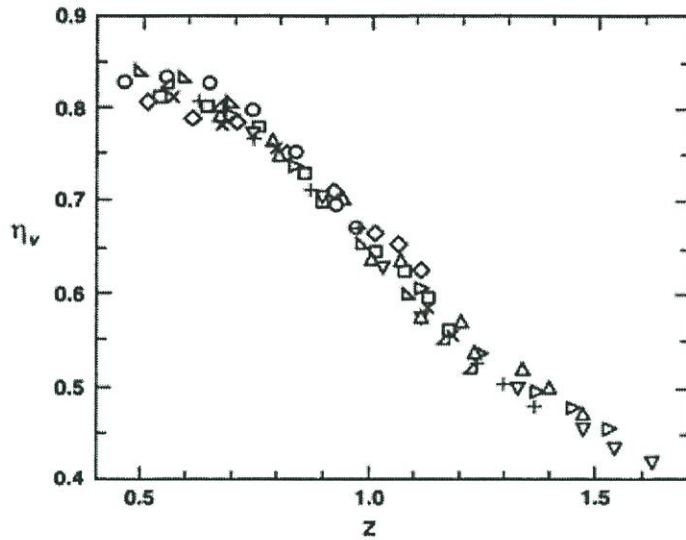


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเครื่องยนต์ และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์ที่ 6000RPM

5.2 ผลของปริมาตรท่อพักอากาศ

5.2.1 ระบบไอดีแบบไม่มีท่อพักอากาศ

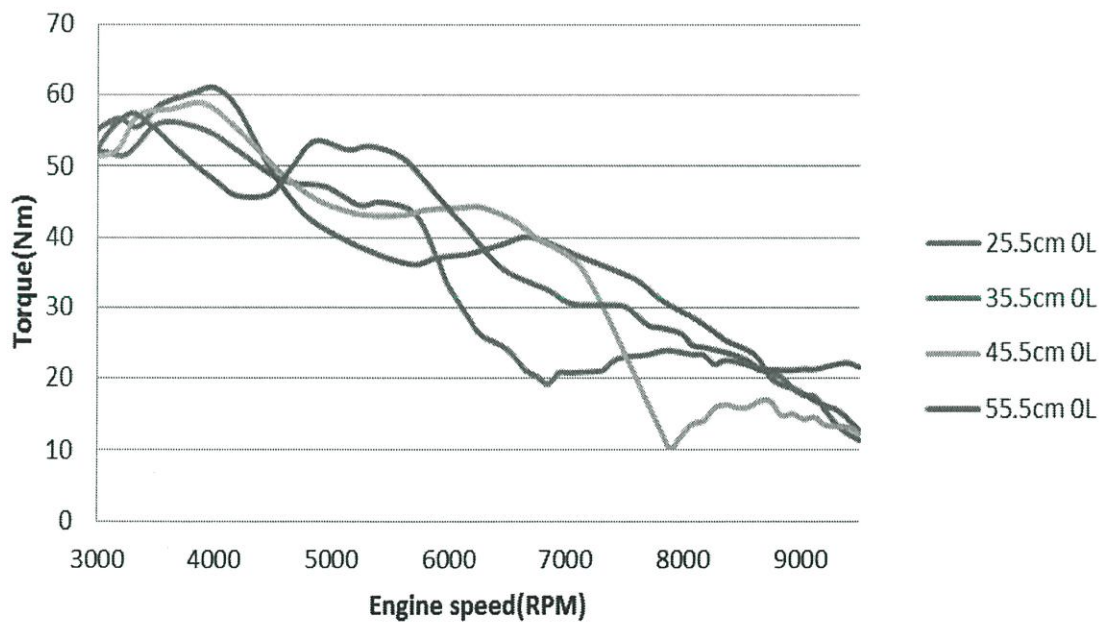
เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองโดยระบบท่อไอดีที่ไม่มีท่อพักอากาศและระบบท่อไอดีที่มีท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตร



รูปที่ 5.2 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเปรียบเทียบกับความเร็วของอากาศภายในท่อไอดี [15]

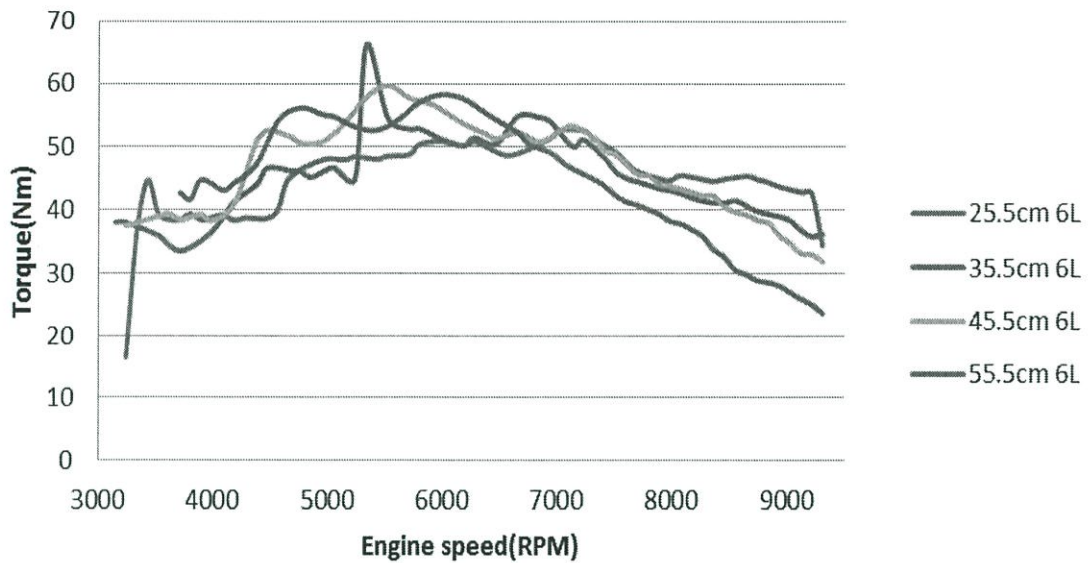
จากรูปที่ 5.2 พบว่าเมื่ออากาศที่ไหลภายในท่อไอดีมีความเร็วมากกว่า 0.5 เท่าของความเร็วเสียง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของระบบไอดีลดลงตามไปด้วย

Torque without plenum



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อไม่มีท่อพักอากาศ

Torque with 6L plenum volume



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์
เมื่อมีท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตร

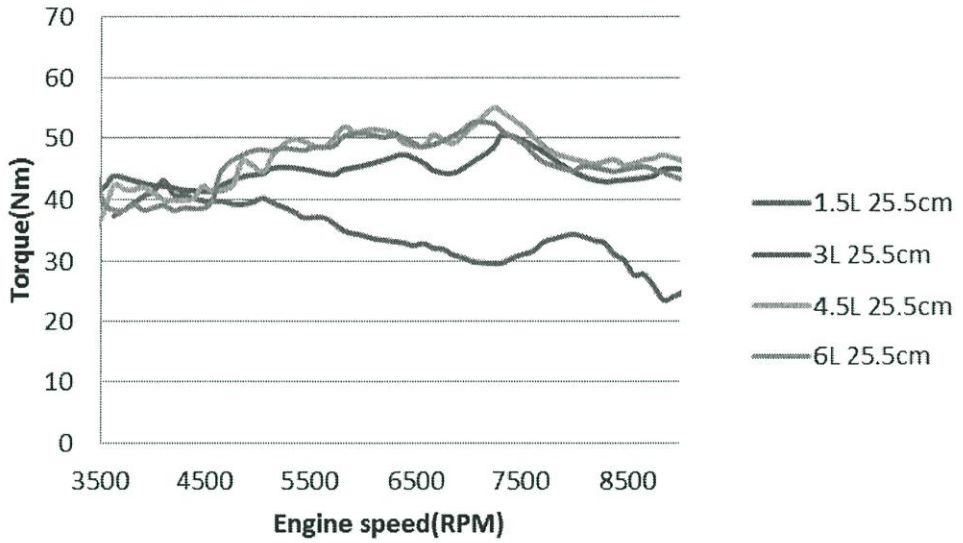
จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 พบว่าระบบไอดีที่ไม่มีท่อพักอากาศ แรงบิดของเครื่องยนต์จะลดลงหลังจากความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงกว่า 4800 รอบต่อนาที และเมื่อคำนวณหาความเร็วอากาศในท่อไอดีที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 4800 รอบต่อนาที พบว่าอากาศที่ไหลในท่อไอดีขณะนั้นมีความเร็ว 0.5 เท่าของความเร็วเสียง เมื่อรอบเครื่องยนต์สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรลดลงส่งผลให้แรงบิดลดลง เป็นไปตามรูปที่ 5.2

เมื่อพิจารณาที่ระบบท่อไอดีที่มีปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร พบว่าแรงบิดของเครื่องยนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและคงที่ต่อไป แสดงให้เห็นว่าอากาศมีความเร็วสูงสุดน้อยลงเนื่องจากท่อพักอากาศมีความจุของอากาศสะสมจึงส่งผลให้ความดันภายในท่อพักอากาศสูงกว่าแบบไม่มีท่อพักอากาศ และทำให้ความเร็วของอากาศลดน้อยลง เพราะความแตกต่างของความดันภายในท่อไอดีกับความดันบรรยากาศลดน้อยลง

5.2.2 ระบบไอดีที่มีปริมาตรท่อพักอากาศแตกต่างกัน

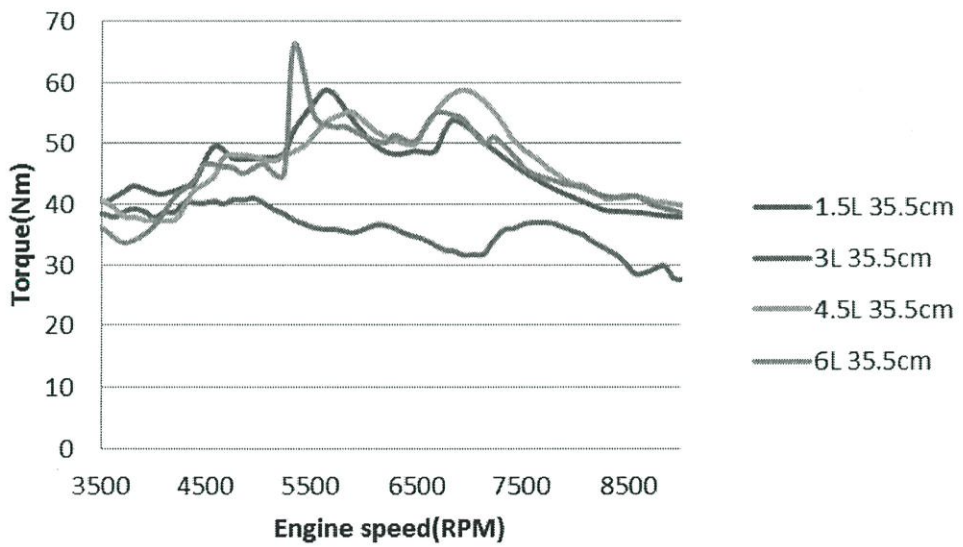
ทำการทดลองโดยการกำหนดค่าระยะความยาวท่อร่วมไอดีและเปรียบเทียบแรงบิดของเครื่องยนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของท่อพักอากาศ

Torque with 25.5cm runner length



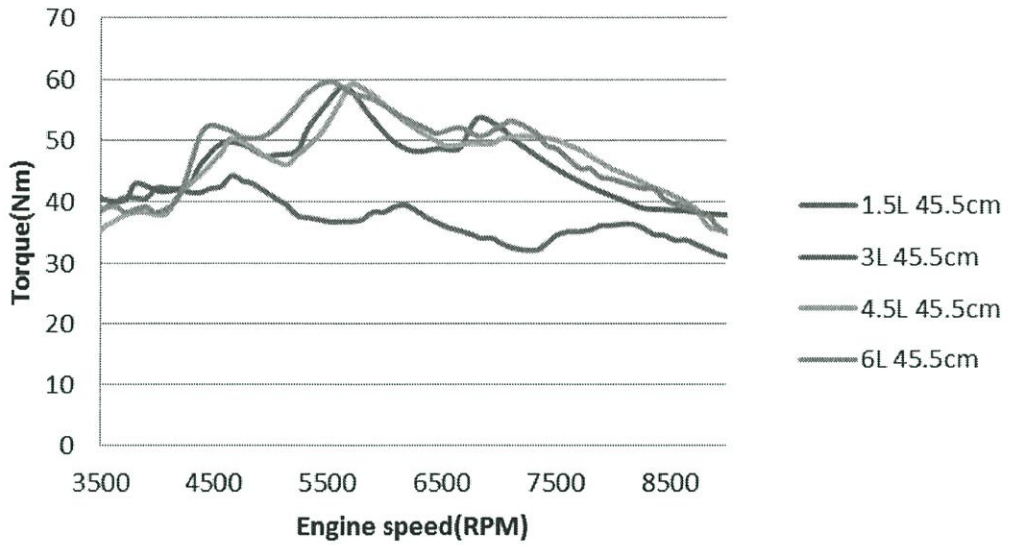
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวท่อร่วมไอดี 25.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ

Torque with 35.5cm runner length



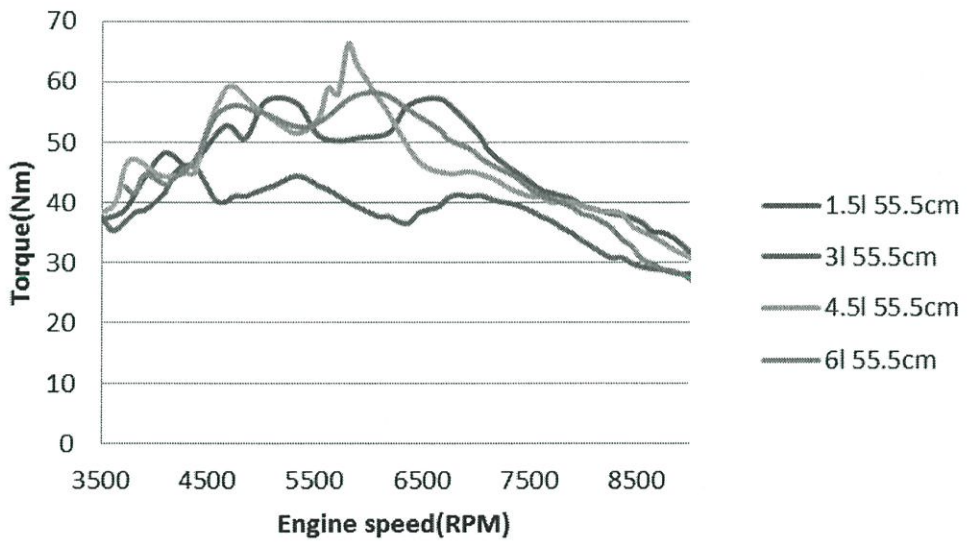
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวท่อร่วมไอดี 35.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ

Torque with 45.5cm runner length



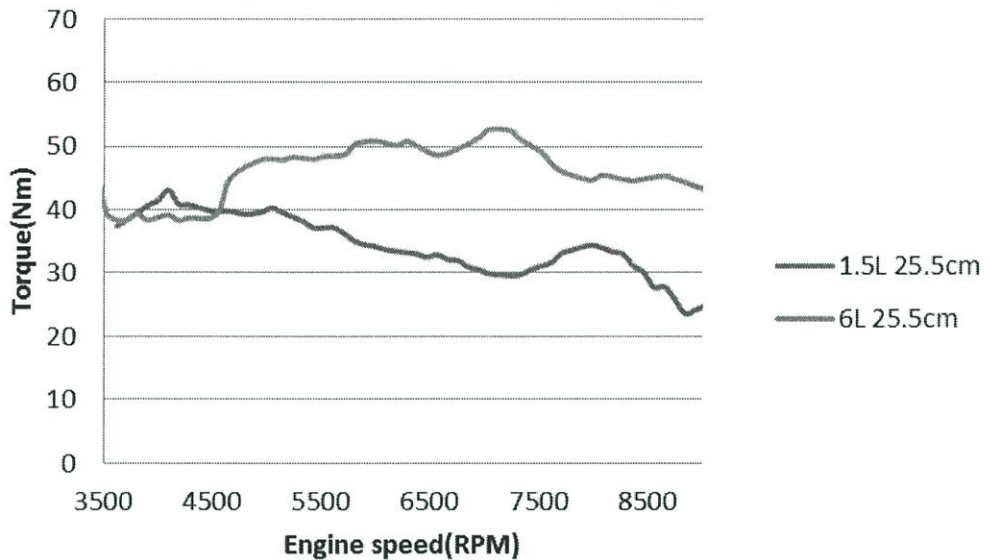
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวท่อร่วมไอดี 45.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ

Torque with 55.5cm runner length



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวท่อร่วมไอดี 55.5 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ

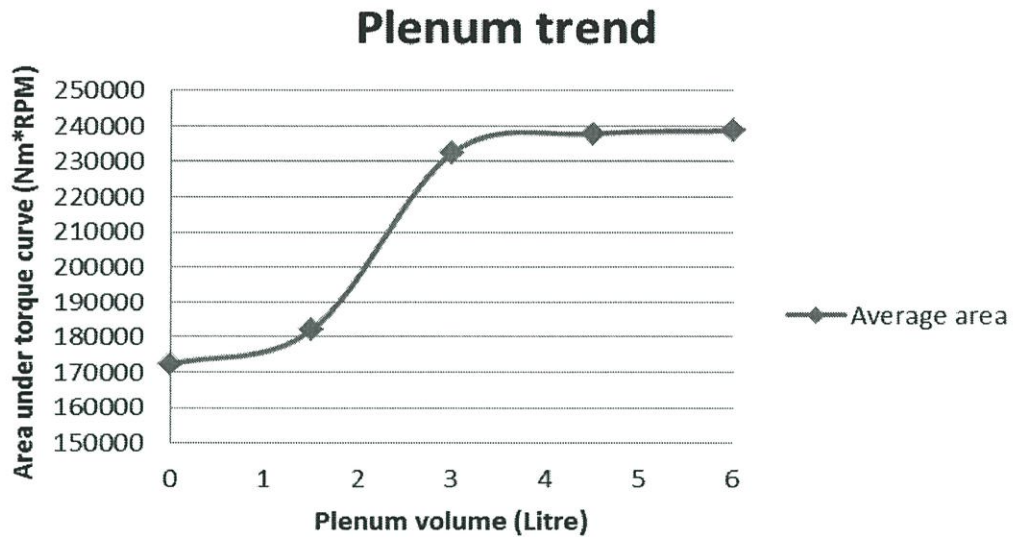
Comparison 1.5L and 6L Plenum volume



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวท่อร่วมไอดี 25.5 เซนติเมตร โดยมีท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตร และ 6 ลิตร

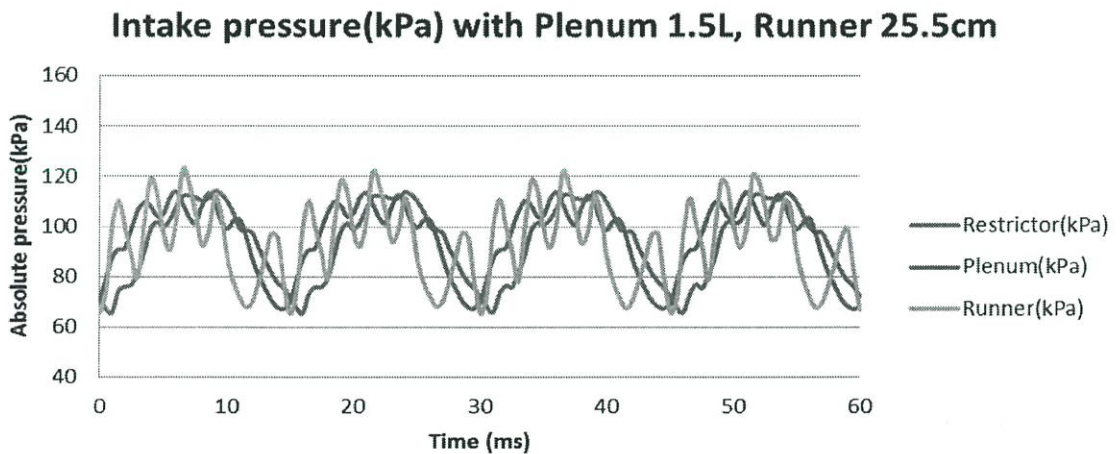
จากรูปที่ 5.5 ถึง 5.8 แสดงให้เห็นว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นเนื่องจากปริมาตรท่อพักอากาศที่แตกต่างกันมีผลต่อกำลังของเครื่องยนต์แตกต่างกัน โดยจะเห็นได้ว่าในทุกกรณีของระยะความยาวท่อร่วมไอดีต่างๆที่ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร เครื่องยนต์มีแรงบิดน้อยที่สุด แต่ที่ปริมาตรท่อพักอากาศ 3, 4.5 และ 6 ลิตร เครื่องยนต์มีแรงบิดใกล้เคียงกัน และ

จากรูปที่ 5.9 เป็นการเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เมื่อระยะความยาวร่วมท่อร่วมไอดี 25.5 เซนติเมตร โดยมีท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตร และ 6 ลิตร เพื่อให้สามารถพิจารณาความแตกต่างได้อย่างชัดเจนว่าปริมาตรที่แตกต่างกันนั้นส่งผลให้แรงบิดของเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงไป โดยแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของท่อพักอากาศที่เพิ่มขึ้นด้วย จากรูปที่ 5.8 แรงบิดเฉลี่ยของท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดที่ทำการทดลองมีค่ามากกว่าแรงบิดเฉลี่ยของท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตร ถึงร้อยละ 30



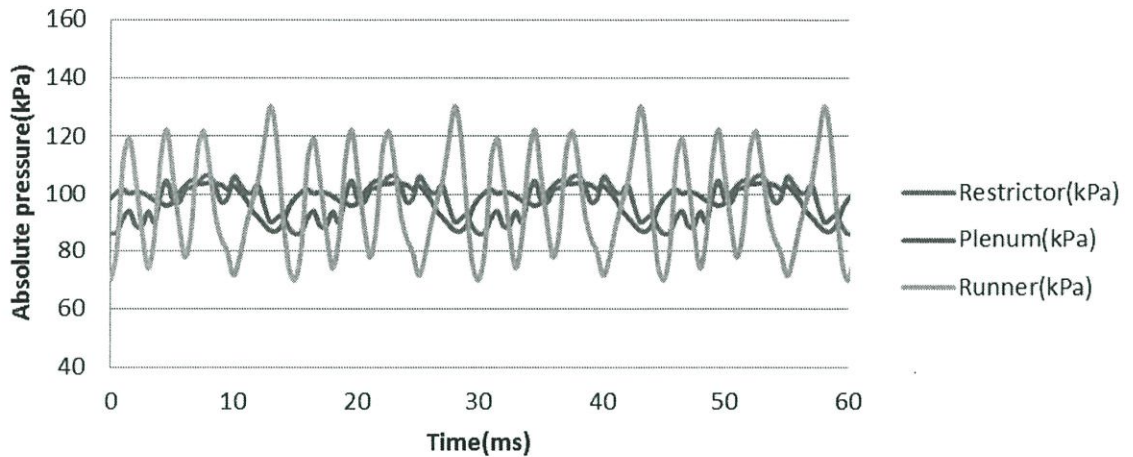
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของแรงบิดของเครื่องยนต์
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรท่อพักอากาศ

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาตรของท่อพักอากาศของท่อไอดีมีผลทำให้แรงบิดของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.10 พบว่าเมื่อขยายปริมาตรท่อพักอากาศจาก 3 ลิตร จนถึงปริมาตร 6 ลิตร นั้นพื้นที่ใต้กราฟของแรงบิดที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงแสดงให้เห็นว่าเป็นการทดลองเกินความจำเป็นหากจะขยายปริมาตรของท่อพักอากาศเพื่อทดสอบเพิ่มเติม



รูปที่ 5.11 แสดงความดันสัมบูรณ์และเวลาภายในระบบท่อไอดี
ของท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตรและความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร

Intake plenum(kPa) with Plenum 6L, Runner 25.5cm



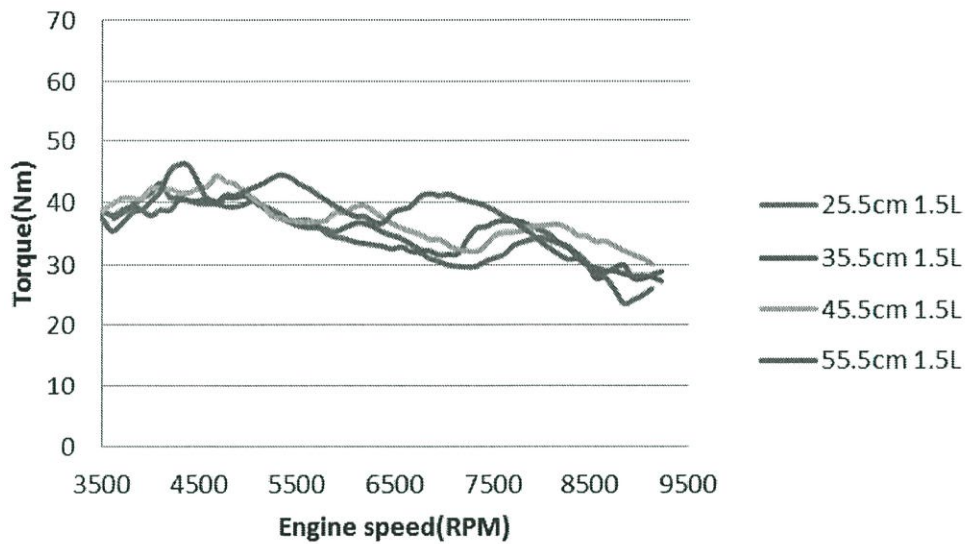
รูปที่ 5.12 แสดงความดันสัมพันธ์และเวลาภายในระบบท่อไอดี
ของท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตรและความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.11 และ 5.12 สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความดันภายในระบบไอดี
เมื่อมีท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตรและ 6 ลิตร พบว่าความดันเฉลี่ยภายในของระบบไอดีที่มีท่อพัก
อากาศปริมาตร 6 ลิตรสูงกว่าของระบบท่อไอดีที่มีท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตรโดยคิดเป็นร้อยละ
2.46 และความแตกต่างของความดันสูงสุดและต่ำสุดของท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตรมีค่าต่ำกว่า
ของท่อพักอากาศ 1.5 ลิตรโดยคิดเป็นร้อยละ 62.06

จากการพิจารณาทำให้ทราบว่า ท่อพักอากาศที่มีปริมาตรใหญ่กว่าจะสามารถให้แรงบิดสูงกว่า
ท่อพักอากาศที่มีปริมาตรน้อย เนื่องจากความเร็วสูงสุดของอากาศที่ไหลผ่านคอคออดมีค่าลดลงเพราะ
มีความแตกต่างของความดันภายในระบบไอดีและความดันบรรยากาศลดลง

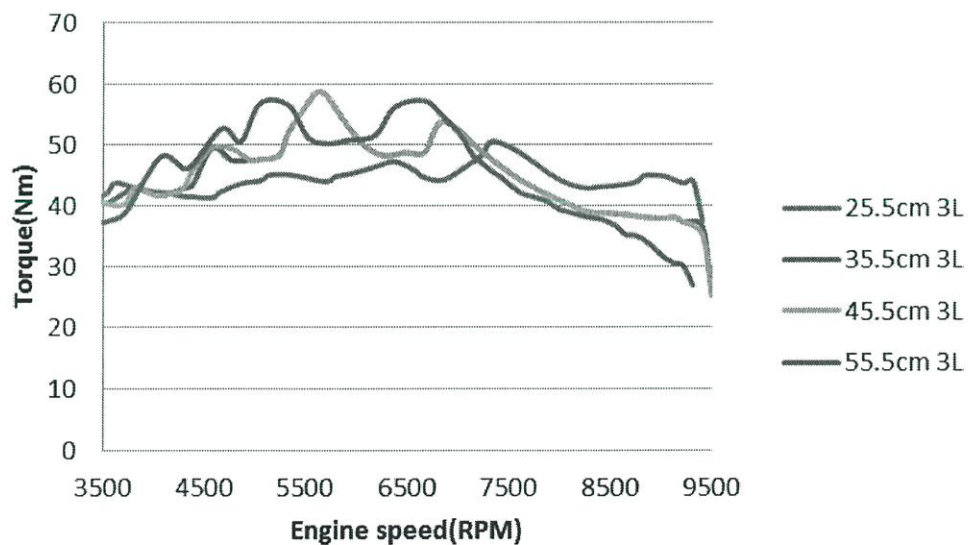
5.3 ผลของความยาวท่อไอดี

Torque with 1.5L plenum



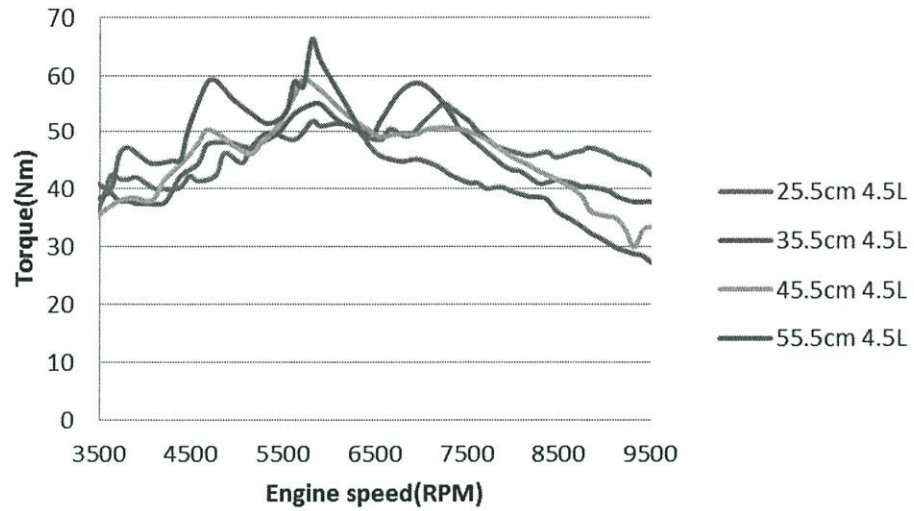
รูปที่ 5.13 แสดงเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความยาวท่อไอดีโดยมีท่อพักอากาศปริมาตร 1.5 ลิตร

Torque with 3L plenum volume



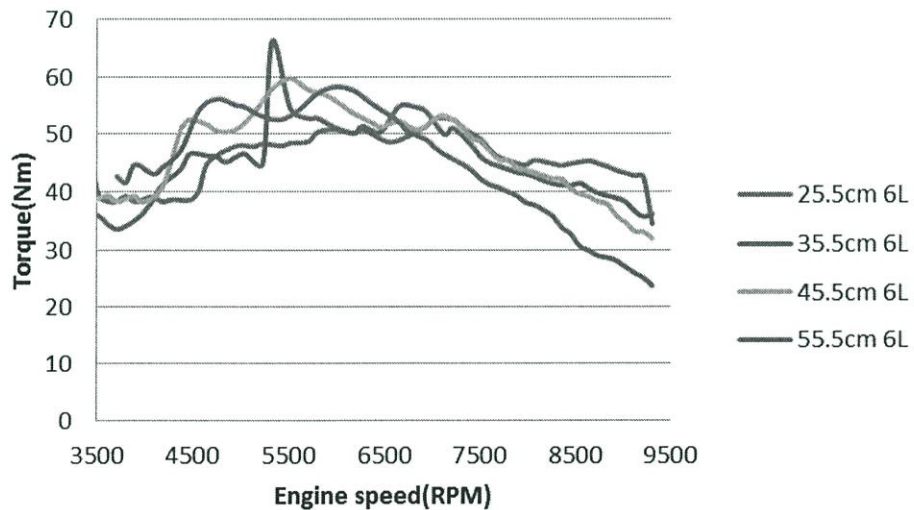
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวท่อรวมไอดี

Torque with 4.5L plenum volume



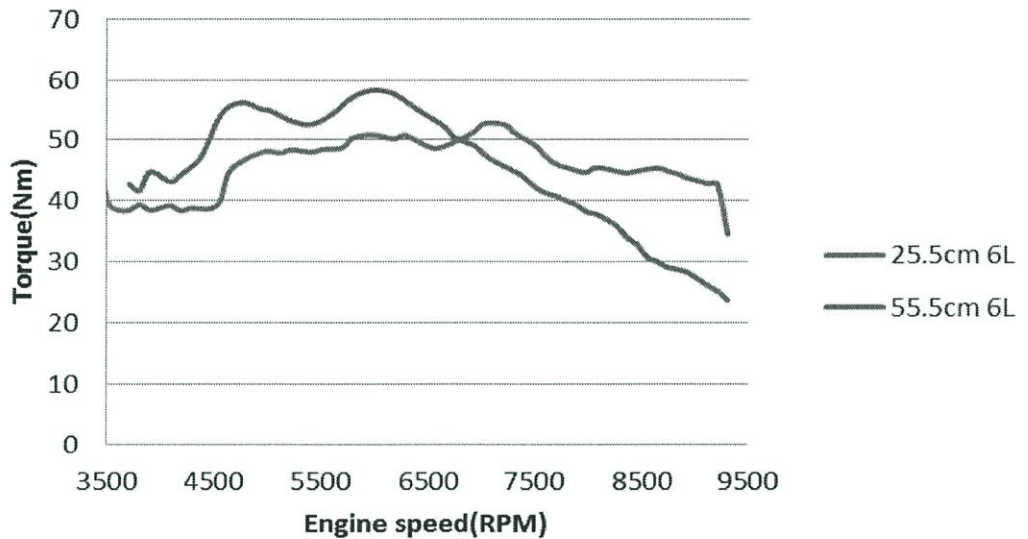
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์
เมื่อปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวท่อร่วมไอดี

Torque with 6L plenum volume



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์
เมื่อปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวท่อร่วมไอดี

Comparison 25.5cm and 55.5cm



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์เมื่อท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตร โดยมีระยะความยาวท่อร่วมไอดี 25.5 เซนติเมตร และ 55.5 เซนติเมตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์โดยการกำหนดปริมาตรของท่อพักอากาศและเปลี่ยนแปลงระยะความยาวท่อไอดีตามที่กำหนด พบว่าทุกกรณีของปริมาตรท่อพักอากาศหากมีการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวท่อไอดีจะมีผลต่อพฤติกรรมแรงบิดของเครื่องยนต์ โดยตำแหน่งของแรงบิดสูงสุดเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์แตกต่างกัน หากพิจารณาจากผลการทดลองที่แตกต่างกันมากที่สุดเพื่อความชัดเจนในการพิจารณาดังรูปที่ 5.17 พบว่าระบบไอดีที่มีปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตรและความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตรและ 55.5 เซนติเมตรซึ่งเป็นความยาวที่สั้นที่สุดและยาวที่สุดตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ได้แรงบิดสูงสุดจากการคำนวณเป็นดังนี้

ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร

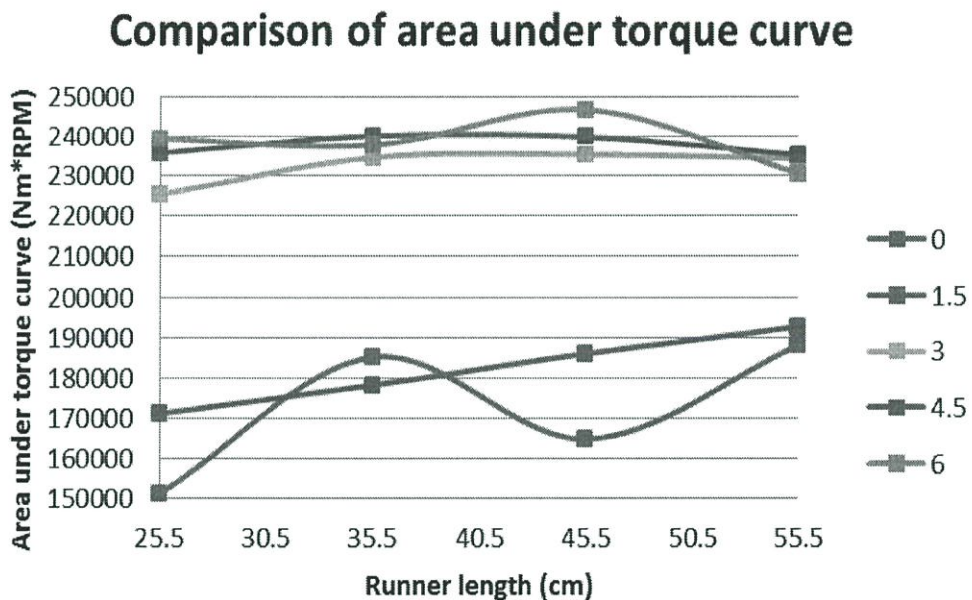
- ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ได้แรงบิดสูงสุดตามการคำนวณ 8000 รอบต่อนาที
 - ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ได้แรงบิดสูงสุดตามจริง 7200 รอบต่อนาที
- คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 จากการคำนวณ

ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร

- ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ได้แรงบิดสูงสุดตามการคำนวณ 5400 รอบต่อนาที
 - ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ได้แรงบิดสูงสุดตามจริง 5800 รอบต่อนาที
- คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 7 จากการคำนวณ

พบว่าหากนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ เครื่องยนต์มีแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็นไปตามการคำนวณตามทฤษฎีของ Helmholtz โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ทั้งนี้คณะผู้จัดทำพิจารณาว่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระบบไอเสียและระบบวาล์วซึ่งอยู่นอกขอบเขตของโครงการวิจัยในครั้งนี้

5.4 เปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมด



รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟแรงบิดของระบบไอดีแต่ละแบบ

จากรูปที่ 5.18 เปรียบเทียบให้เห็นว่าระบบท่อไอดีที่ดีที่สุดเพื่อใช้สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา คือ ท่อร่วมไอดีที่มีระยะความยาว 45.5 เซนติเมตรและมีท่อพักอากาศปริมาตร 6 ลิตรเนื่องจากพื้นที่ใต้กราฟแรงบิดและความเร็วรอบเครื่องยนต์แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณแรงบิดทั้งหมดเท่าไร จึงเลือกใช้ระบบท่อไอดีที่มีความยาวและปริมาตรข้างต้น

บทที่ 6

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1. วิจารณ์ผลการทดลอง

- 6.1.1 อุปกรณ์ทดลองจำลองระบบไอดีทำขึ้นเพื่อปรับตัวแปรให้ตรงตามการทดลองจึงไม่สามารถนำไปใช้ในการแข่งขันจริงๆได้
- 6.1.2 ผลที่ได้จากการทดลองมีความผิดพลาดเกิดจากการออกแบบท่อไอเสียและส่วนอื่นๆของเครื่องยนต์ ซึ่งอยู่นอกเหนือจากขอบเขตของโครงงาน

6.2. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 6.2.1 สมการการคำนวณหาระยะความยาวท่อไอดีสามารถใช้ได้จริง
- 6.2.2 ทราบถึงพฤติกรรมของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อไอดีและปริมาตรท่อพักอากาศ
- 6.2.3 ชุดทดลองที่ทำขึ้นสามารถนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผลของการออกแบบในส่วนอื่นๆของเครื่องยนต์ได้
- 6.2.4 ผลการทดลองที่ได้จากโครงงานนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบไอดีสำหรับใช้ในรถแข่งสูตรนักศึกษาได้

6.3. อุปสรรคและแนวทางแก้ไข

- 6.3.1 อุปกรณ์วัดมวลการไหลของอากาศมีความผิดพลาดจึงไม่นำผลที่ได้จากอุปกรณ์วัดนี้มาวิเคราะห์ผล
- 6.3.2 เนื่องจากการทดลองจำนวนหลายครั้งทำให้ชิ้นส่วนต่างๆของรถแข่งสูตรนักศึกษาชำรุดจึงต้องมีการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน
- 6.3.3 เครื่องยนต์ของรถแข่งสูตรนักศึกษามีเสียงดังมากในขณะที่ทำการทดลองซึ่งรบกวนการเรียนการสอนภายในสถาบัน จึงต้องทำการทดลองในเวลากลางคืน
- 6.3.4 เกิดการสั่นไถลของยางของรถแข่งสูตรนักศึกษากับอุปกรณ์วัดกำลังของรถยนต์ แชสซิสไดนาโมมิเตอร์ (Chassis dynamometer) จึงต้องใช้น้ำยากันสั่นไถลเป็นตัวช่วยให้ยางยึดเกาะกับอุปกรณ์

6.3.5 เนื่องจากการทดลองมีขอบเขตอยู่ที่การเปลี่ยนแปลง 2 กรณี คือระยะเวลาความยาวของท่อไอดีและปริมาตรของท่อพักอากาศ จึงทำให้ไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงในกรณีอื่นๆ เช่น วัสดุของระบบไอดี รูปทรง และตัวจำกัดอากาศ

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 ควรมีโครงการทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับการออกแบบคอคอดอากาศ วัสดุที่ใช้ และรูปทรงของท่อพักอากาศเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

6.4.2 ควรมีท่อพักไอเสียเพื่อเก็บเสียงของเครื่องยนต์ขณะทำการทดลอง

บรรณานุกรม

- [1] <http://www.fsaeonline.com/content/2013%20FSAE%20Rules%2002%2026%2013%20FINAL.pdf>, Part IC
- [2] Willard W. Pulkrabek. (2003). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Prentice Hall.
- [3] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/290504/internal-combustion-engine>
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Air%E2%80%93fuel_ratio
- [5] http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Electronic_Fuel_Injection_System/unit3-1.html
- [6] http://www.superstreetonline.com/techarticles/sstp_1112_toyo_proxes_t1_sport_skunk2_throttle_body/photo_02.html
- [7] นายธีรวัฒน์ กิณรี, นายเมฆ ศรีหล่มสัก, นายอรรถวุฒิ หนูทอง. 2555. “การศึกษาและพัฒนาท่อร่วมไอดีสำหรับรถสูตรนักศึกษา.” คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเครื่องกล, สจล.
- [8] Roger C.Baker. (2000).Flow Measurement Handbook. New York: Cambridge University Press.
- [9] Martin Musial. Intake manifold design and testing. Modified Magazine
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Velocity_stack
- [11] Gordon P.Blair, W.Melvin Cahoon. (2006). Best Bell. Race Engine Technology Magazine.
- [12] <http://www.chrysler300club.com/uniq/allaboutrams/ramtheory>
- [13] Hermann Hiereth Peter Prenninger. (2003).Charging the Internal Combustion Engine,Powertrain. SpringerWienNewYork.

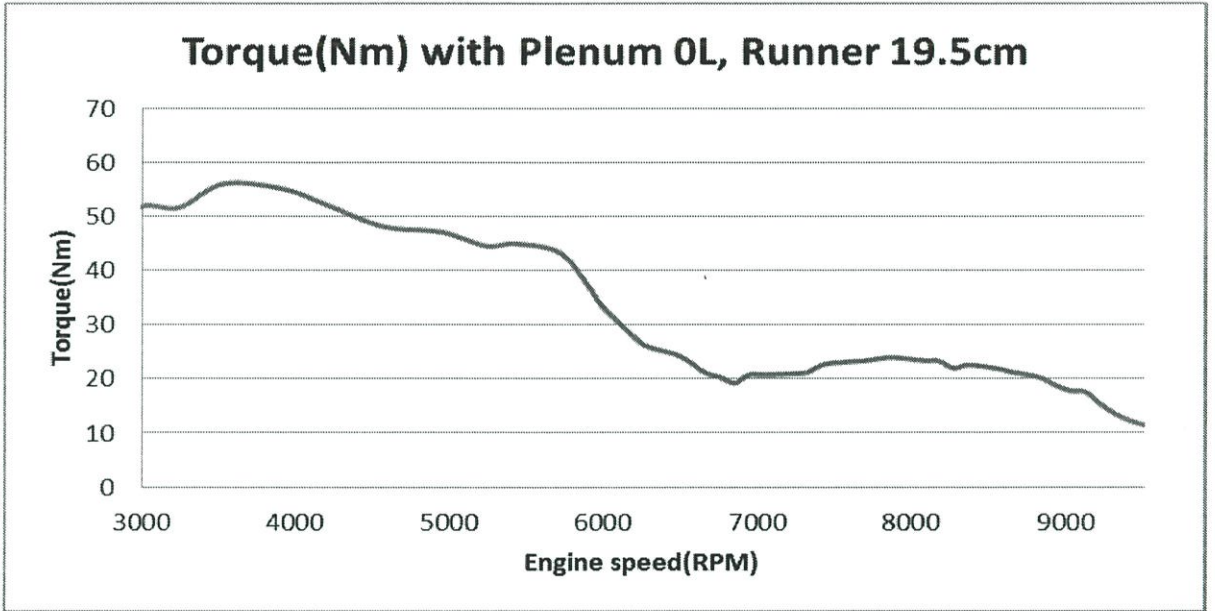
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] John L. Lumley . (1999) . Engines: An Introduction . Cambridge University Press
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_resonance

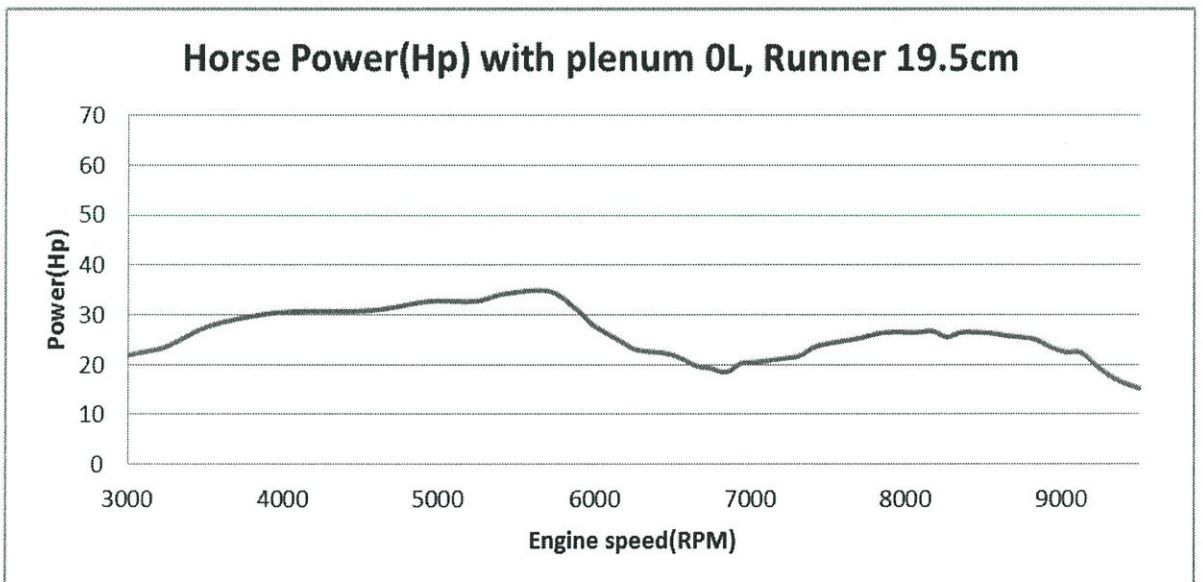
ภาคผนวก

ผลการทดลอง

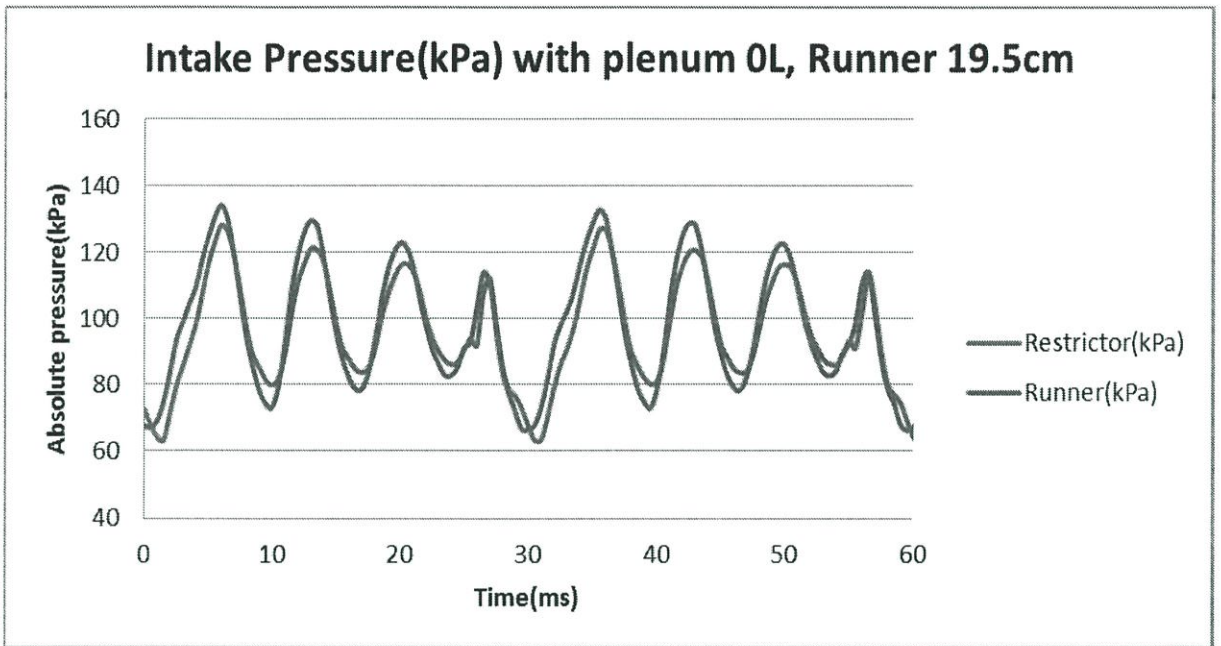
กรณีที่ 1 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 19.5 เซนติเมตร



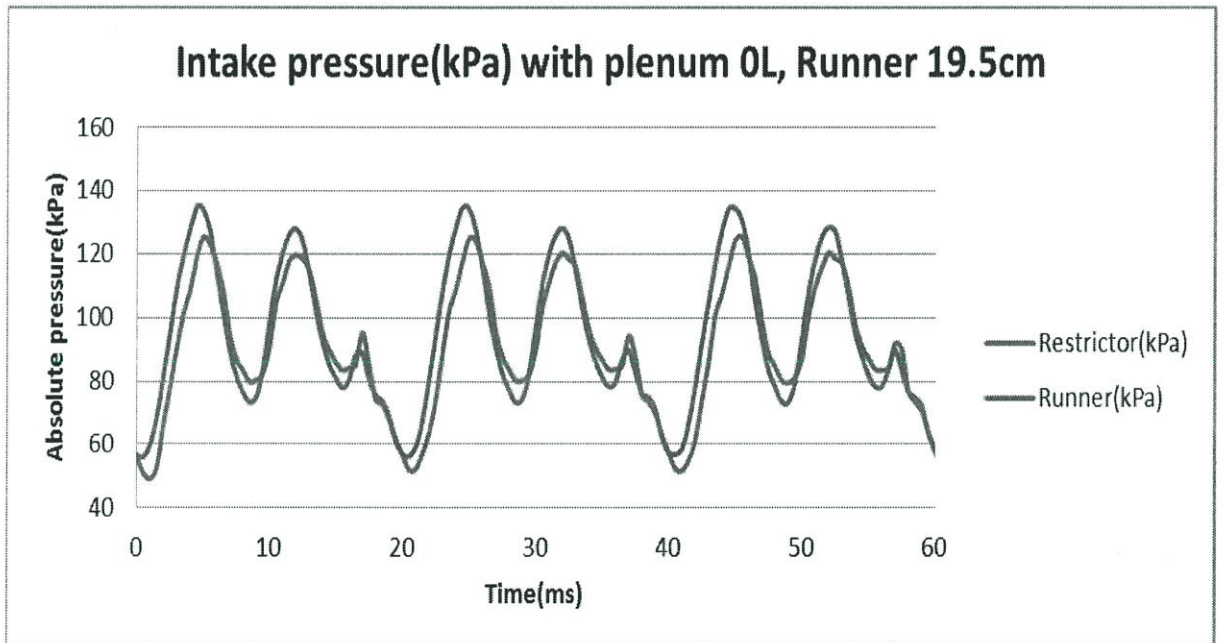
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 19.5 เซนติเมตร



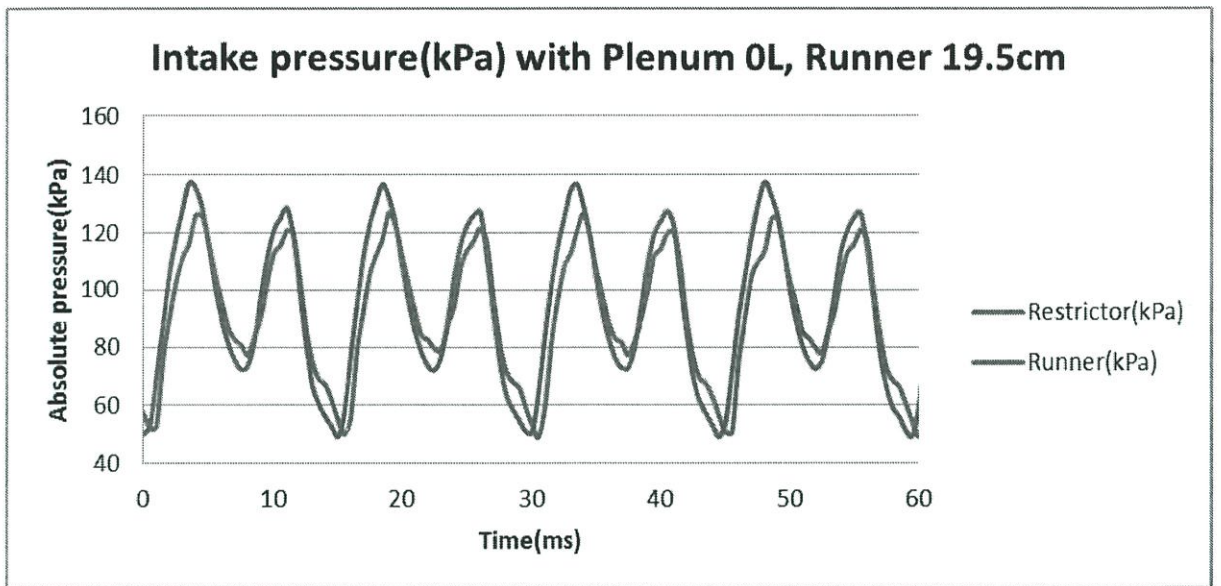
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 19.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

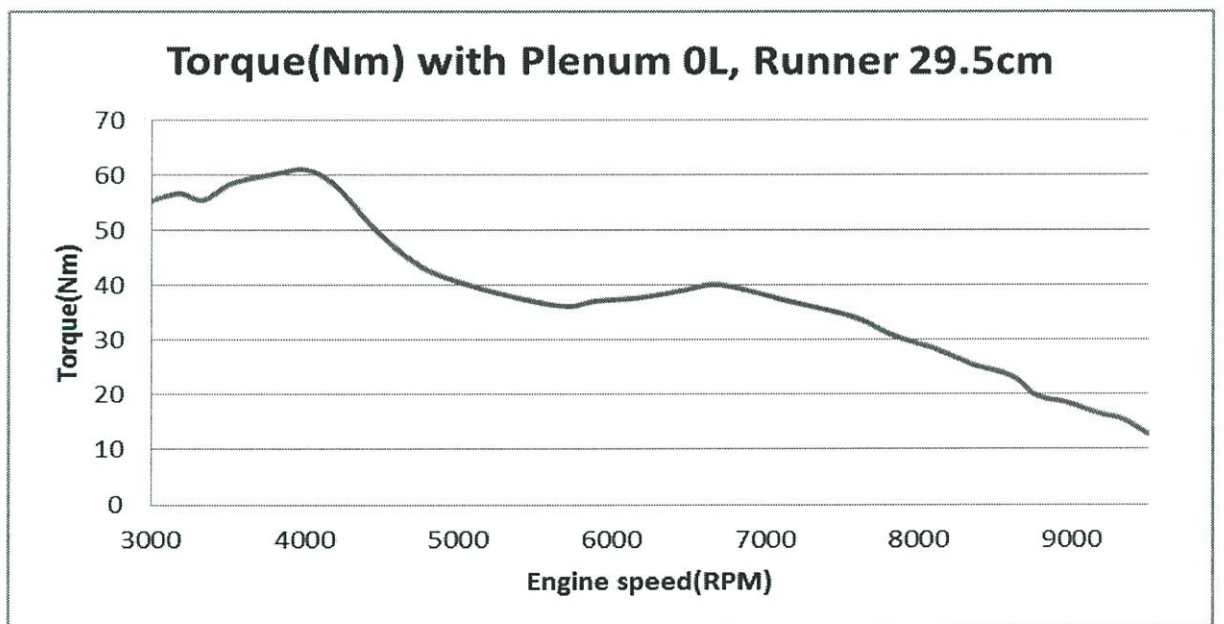


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

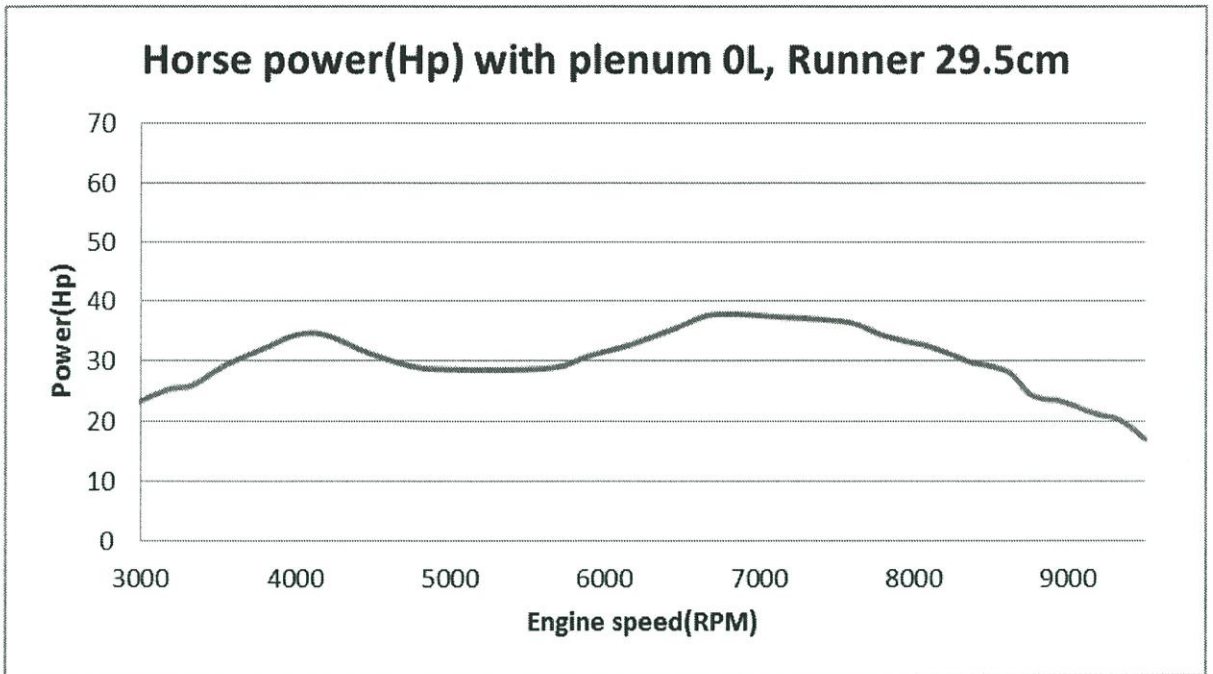


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอต ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

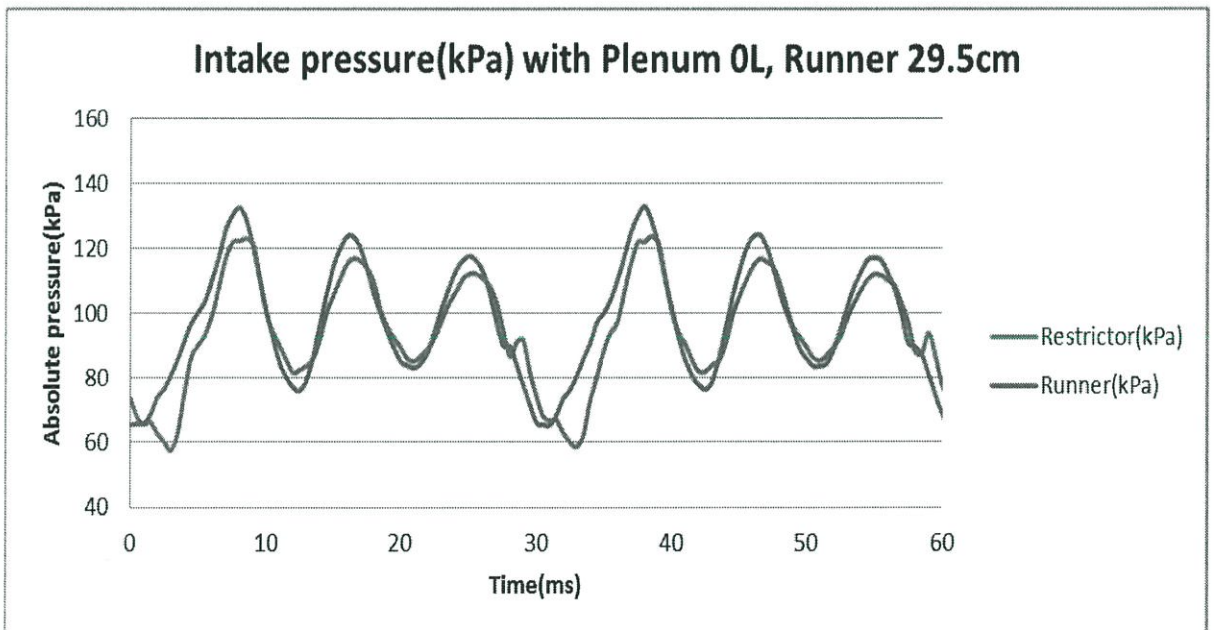
กรณีที่ 2 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 29.5 เซนติเมตร



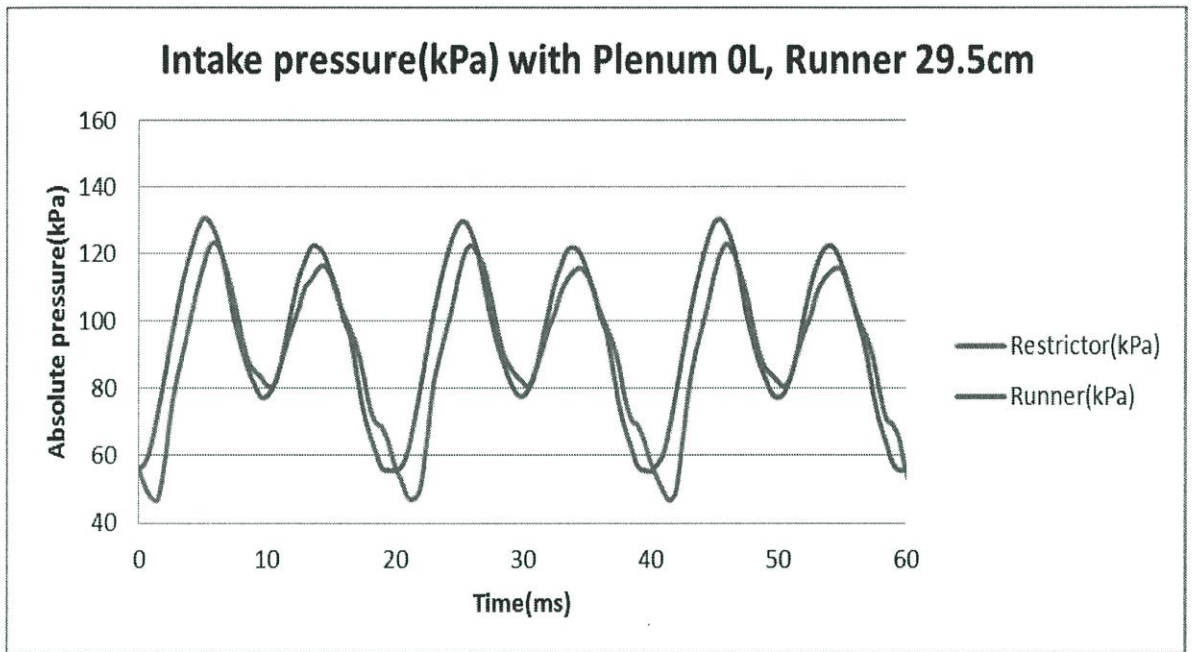
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 29.5 เซนติเมตร



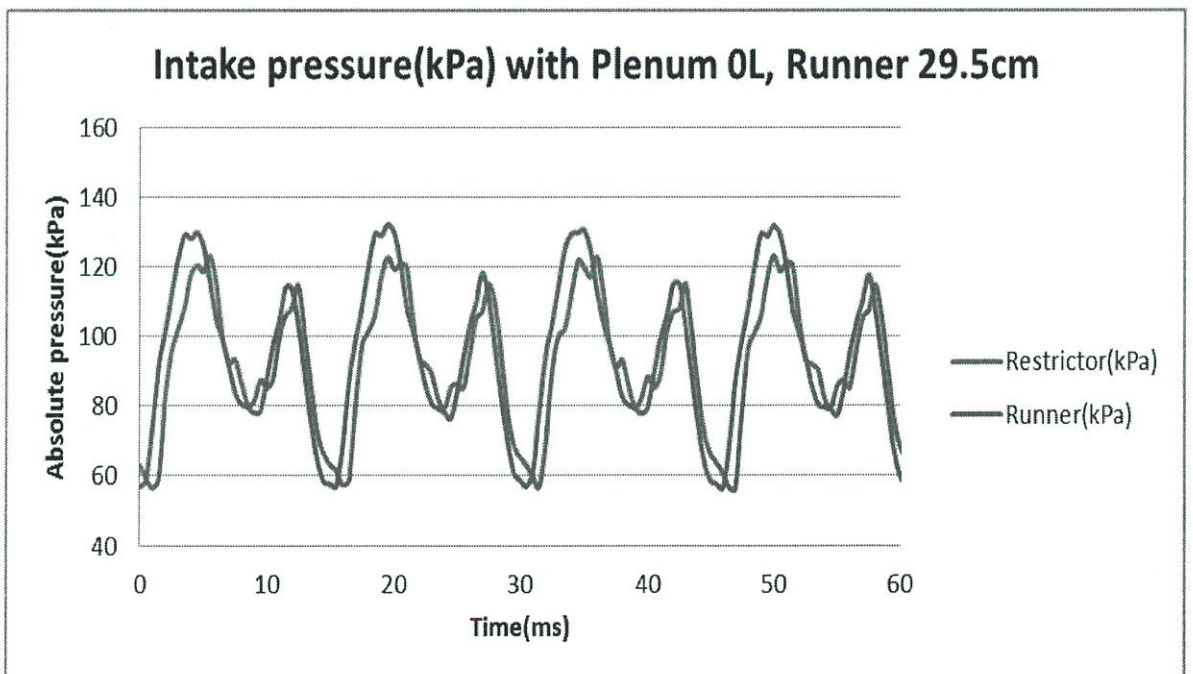
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 29.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

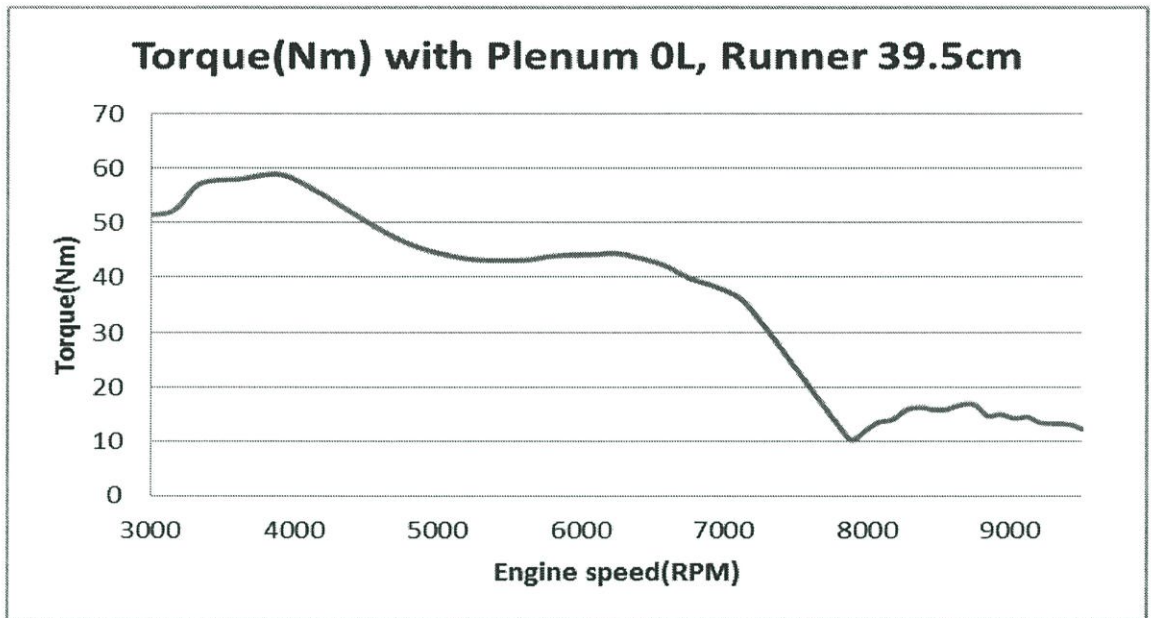


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

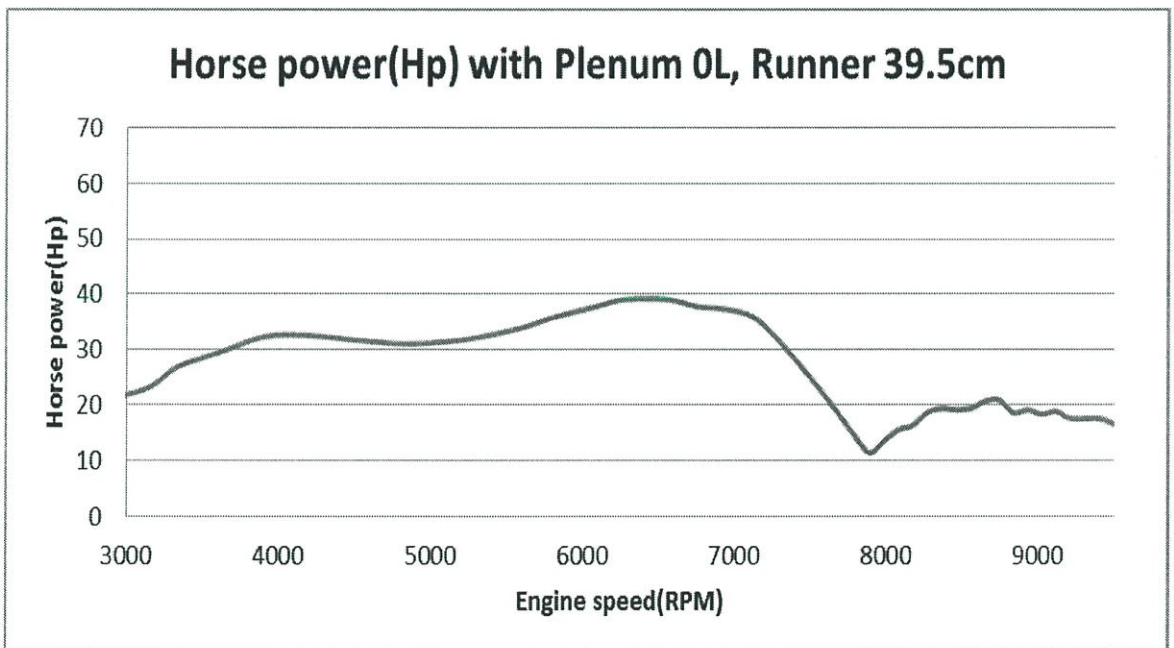


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

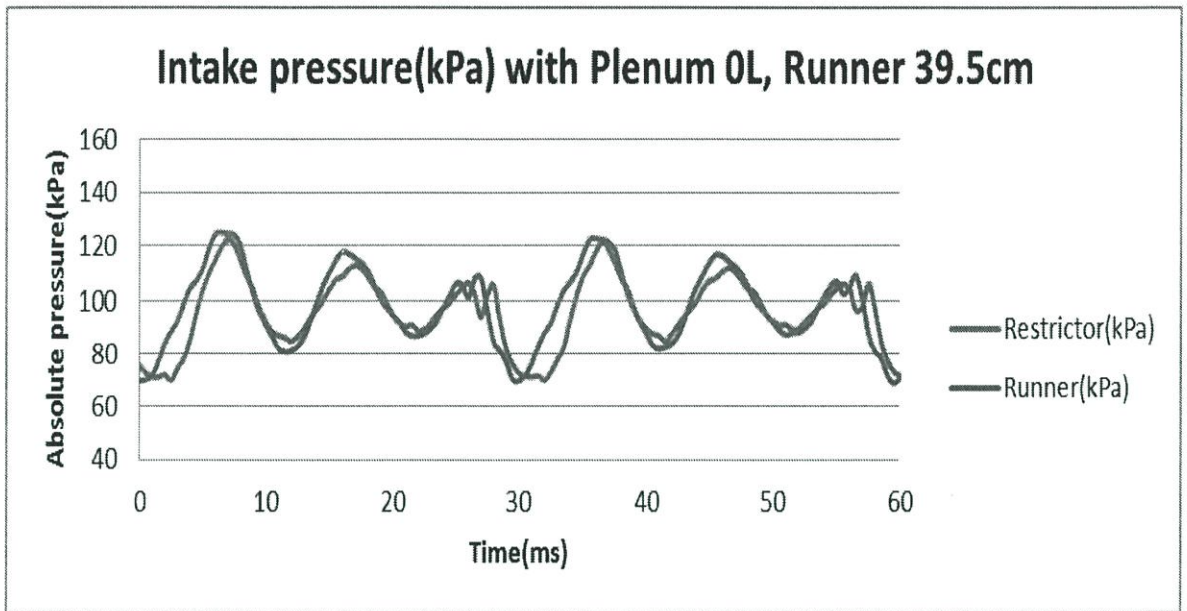
กรณีที่ 3 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 39.5 เซนติเมตร



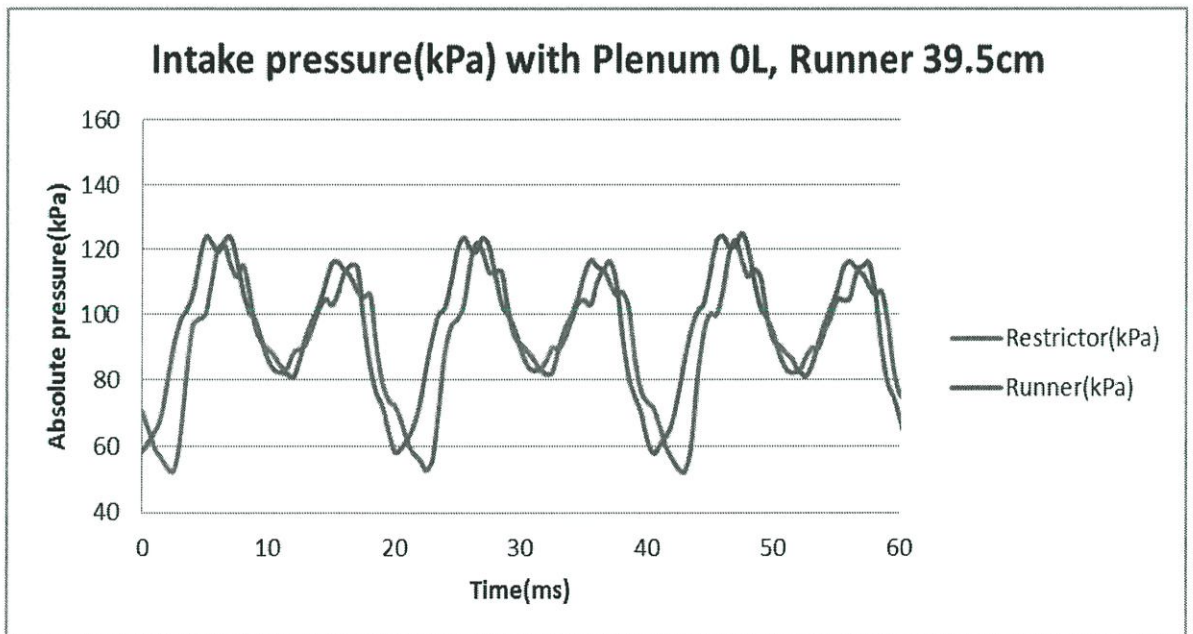
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 39.5 เซนติเมตร



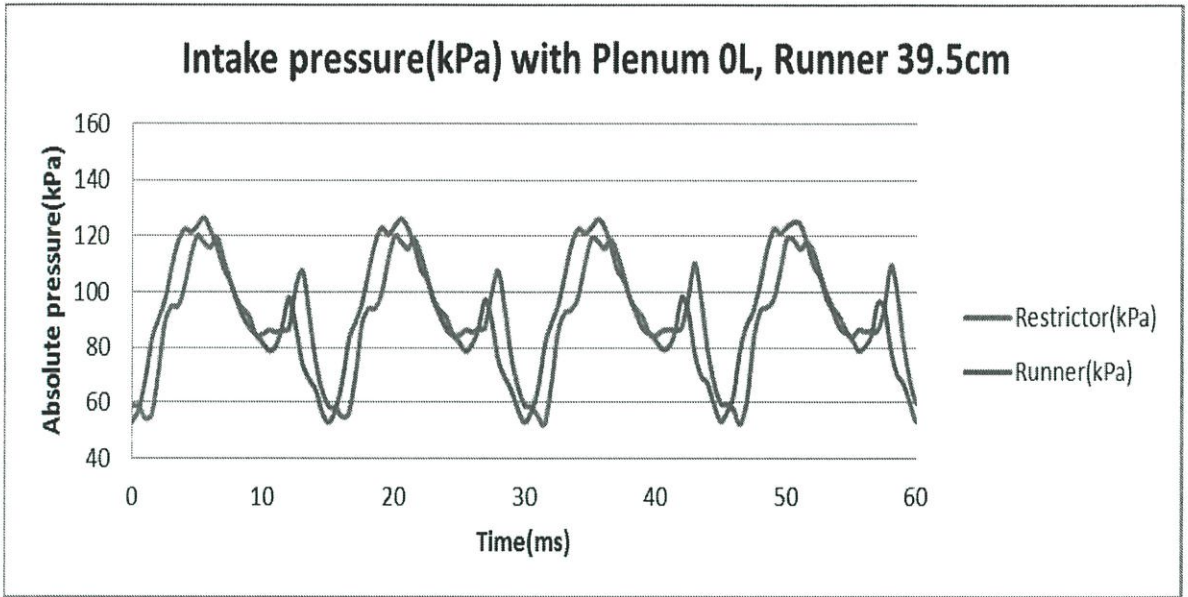
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 39.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

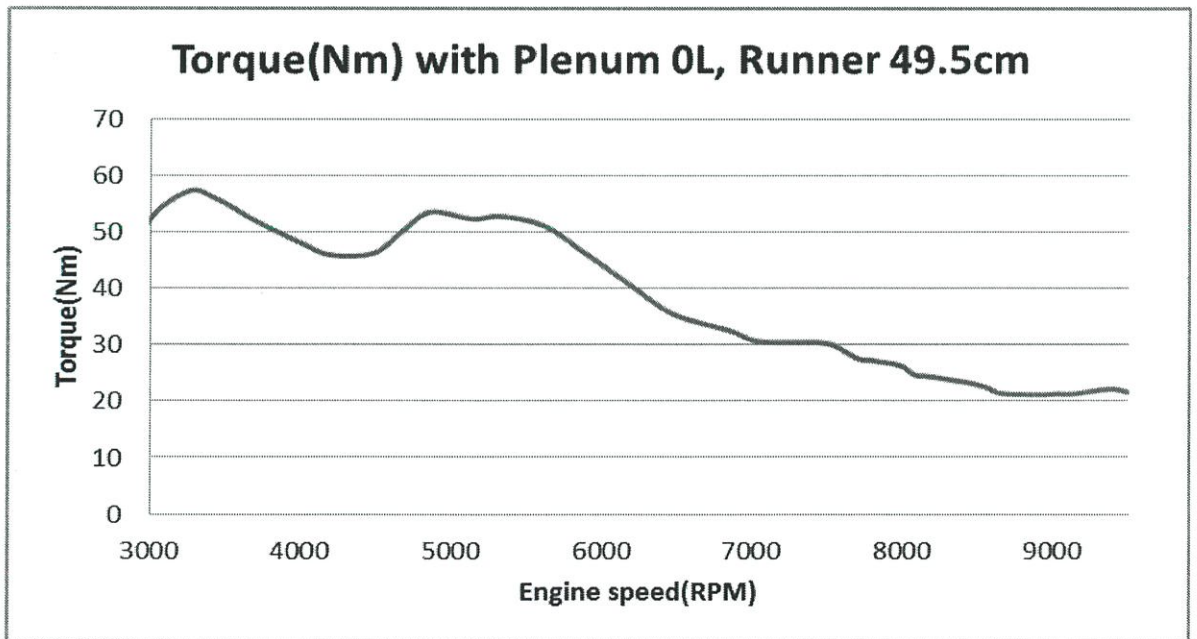


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

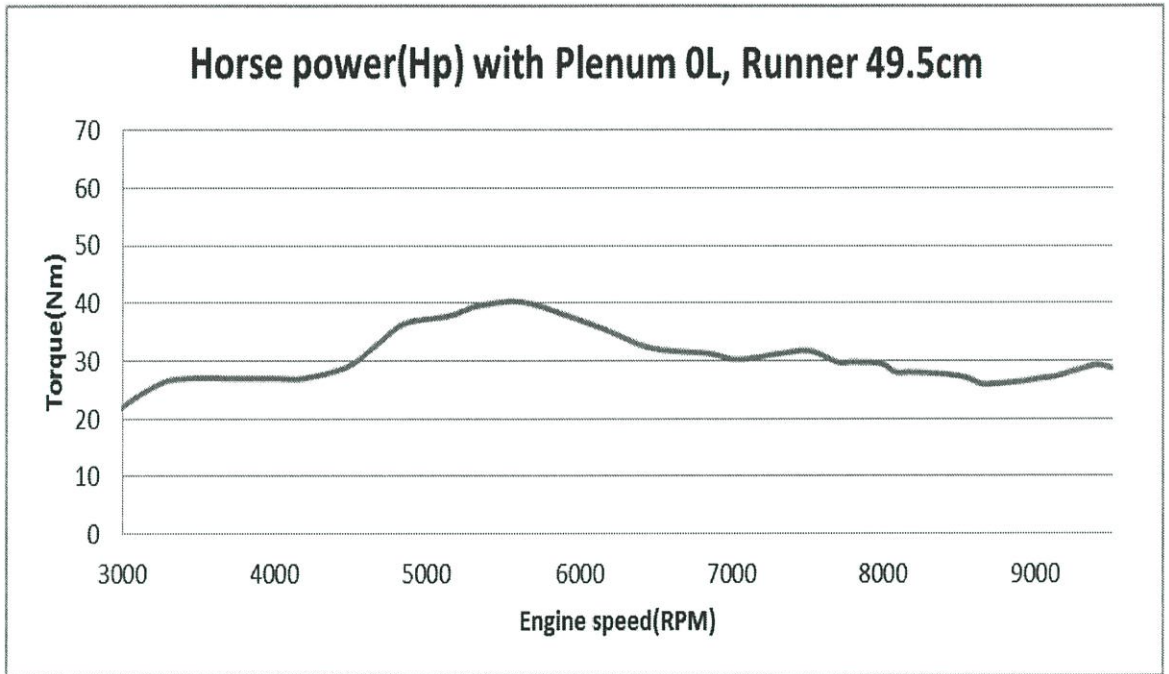


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

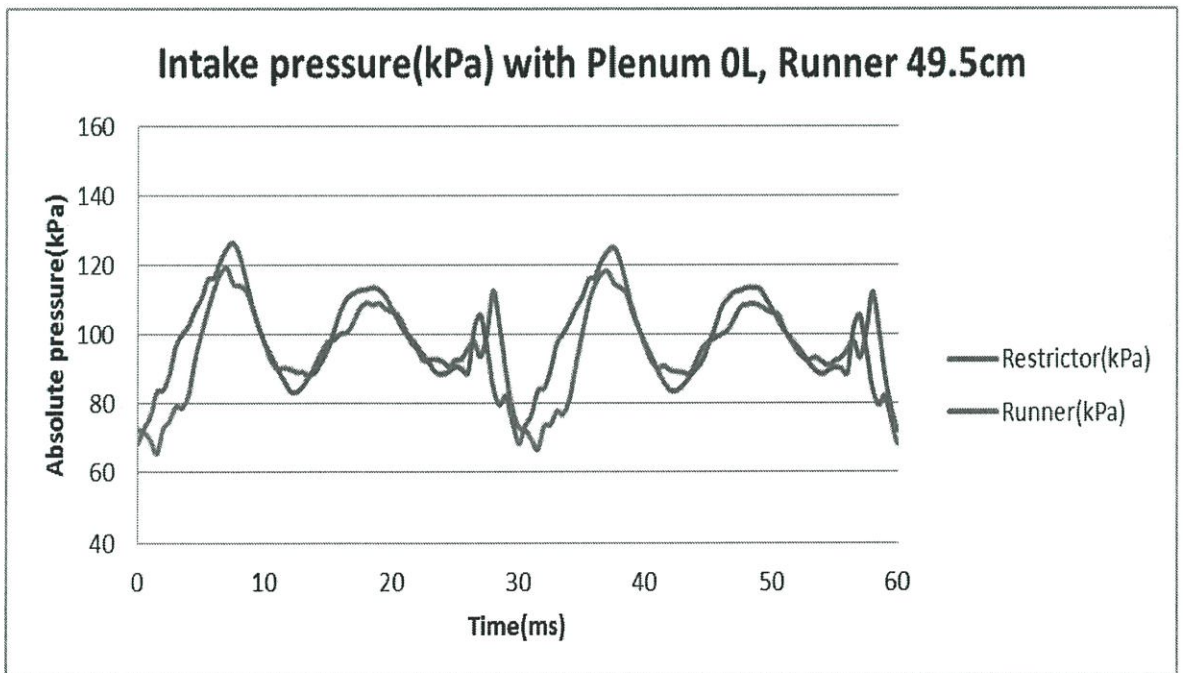
กรณีที่ 4 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 49.5 เซนติเมตร



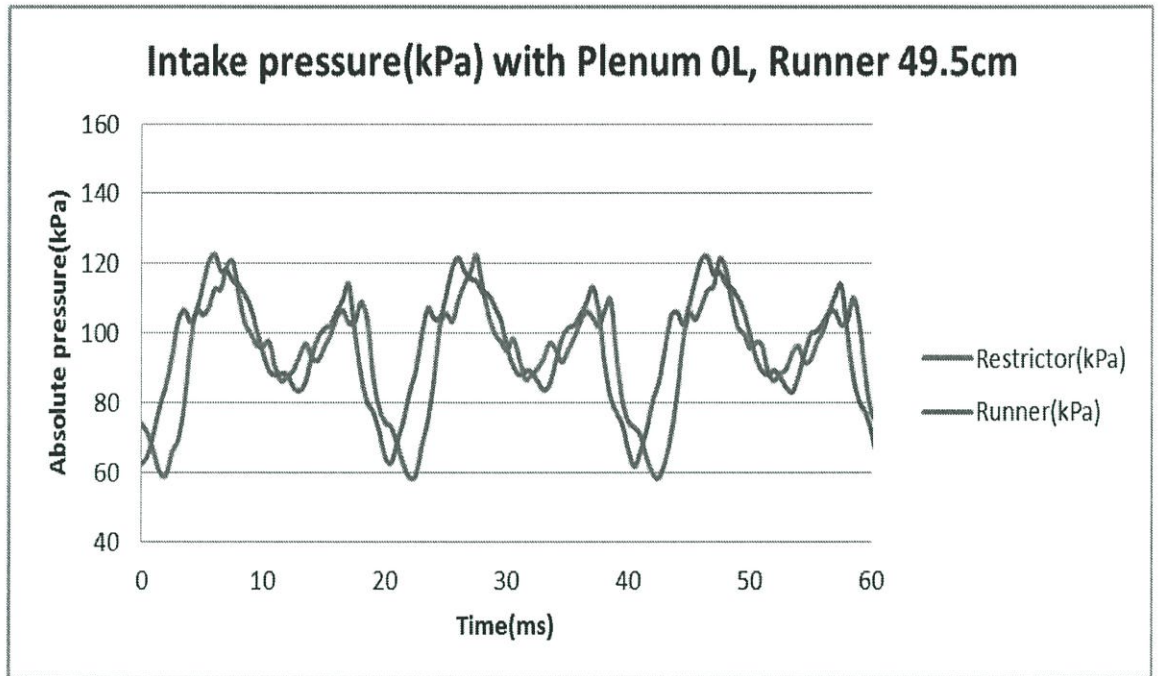
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 49.5 เซนติเมตร



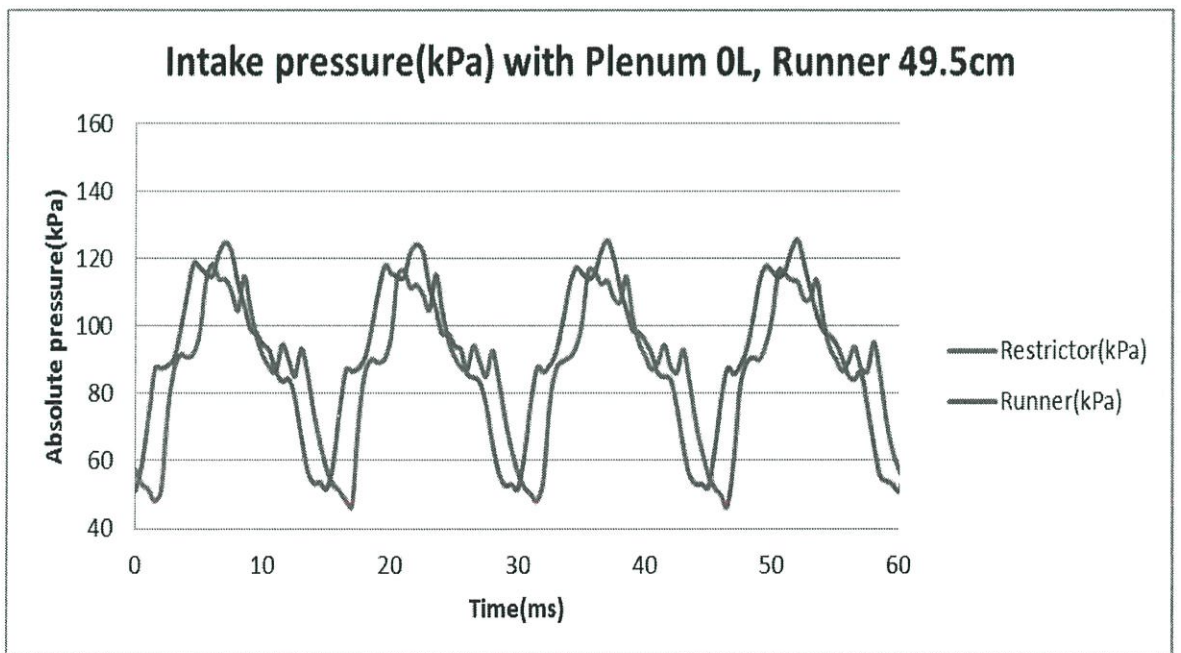
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 0 ลิตร ความยาวท่อไอดี 49.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

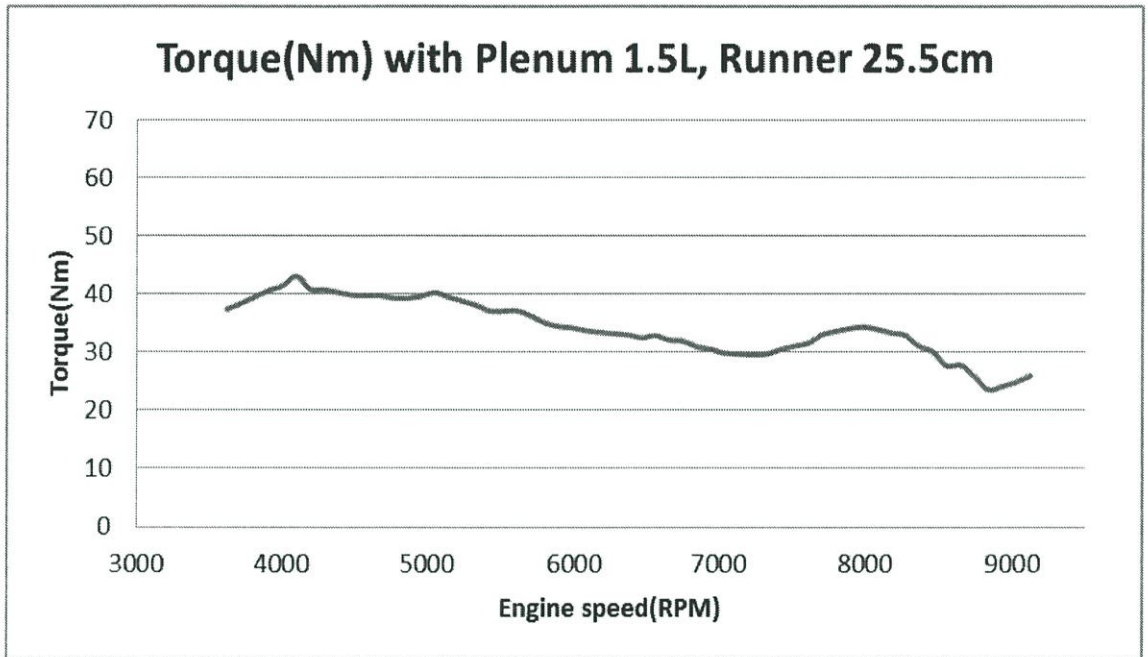


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

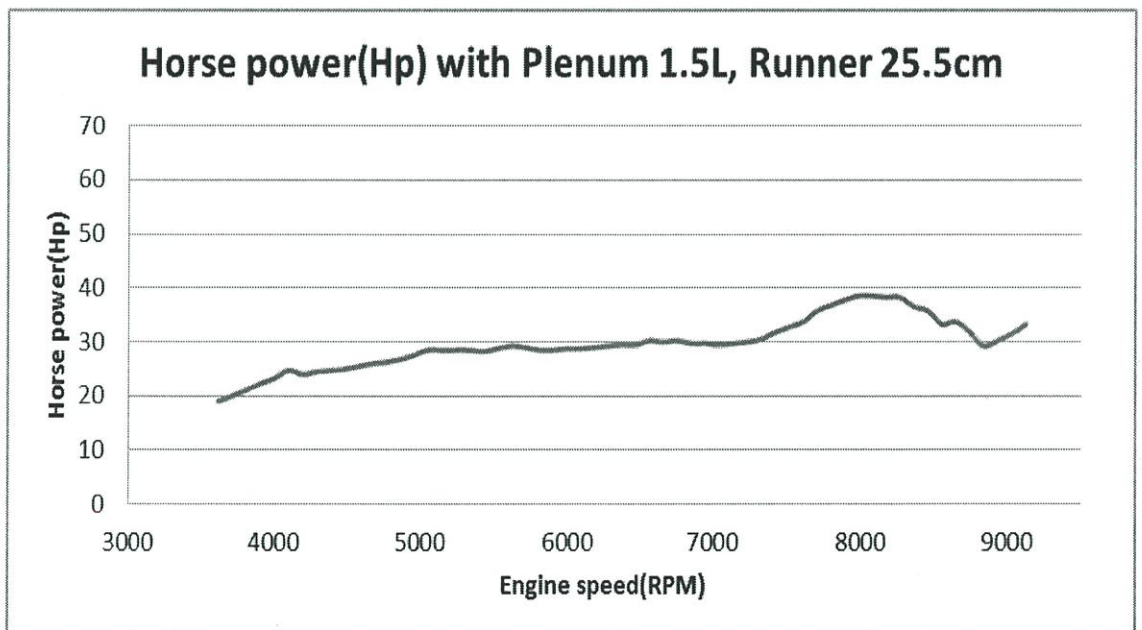


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

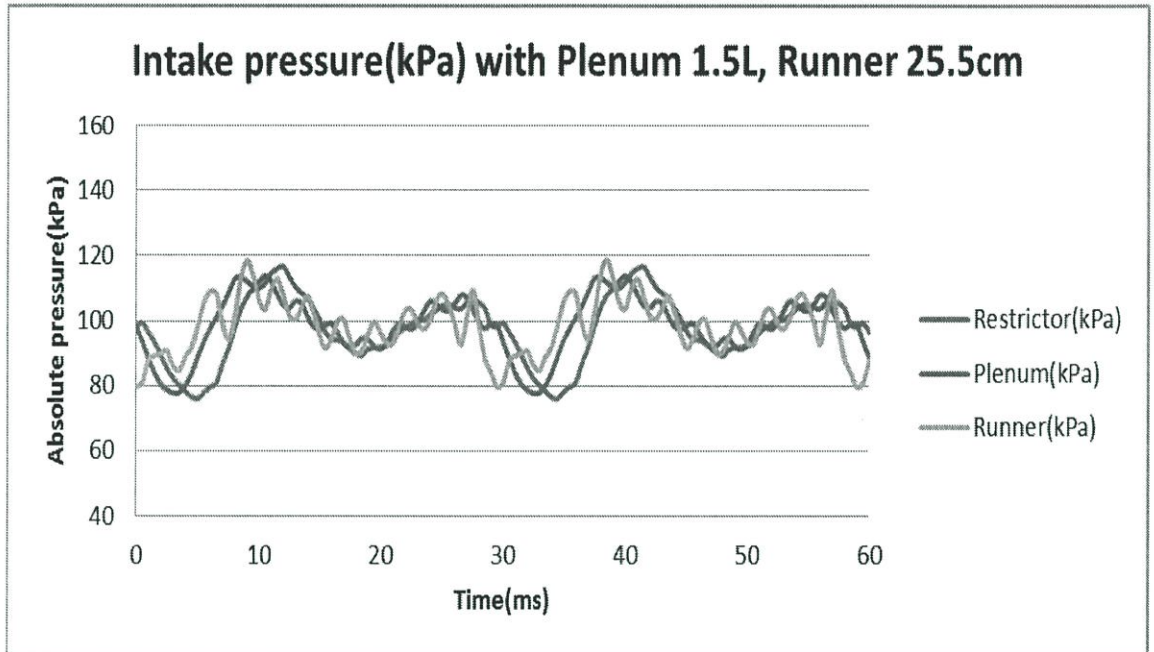
กรณีที่ 5 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



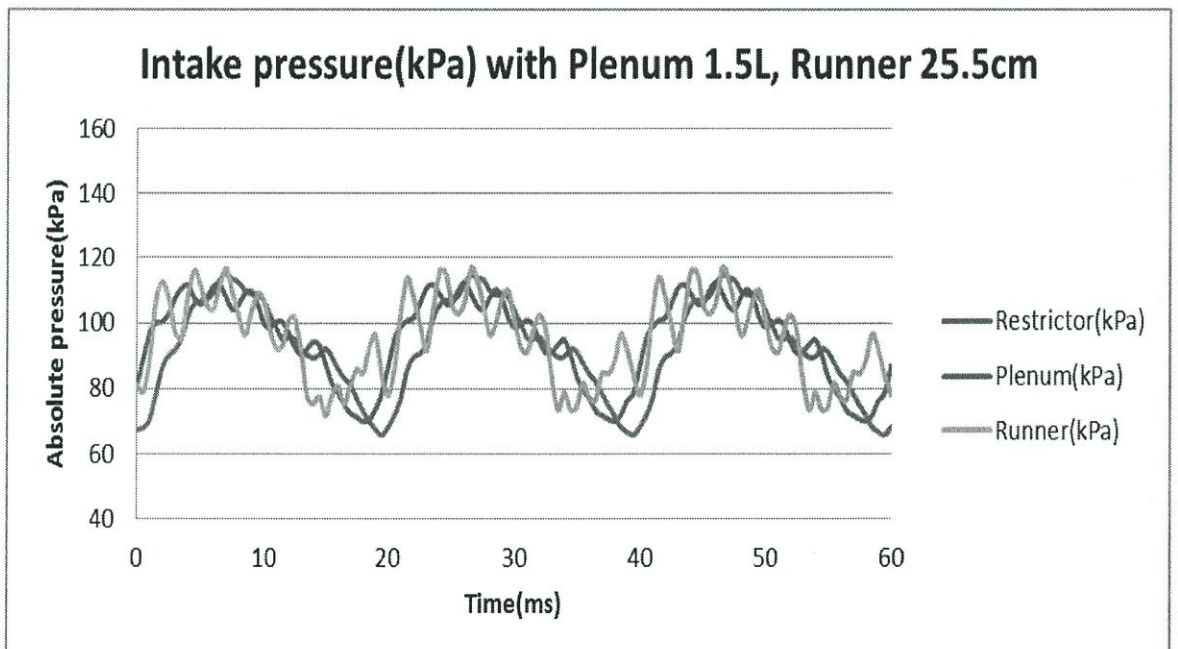
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



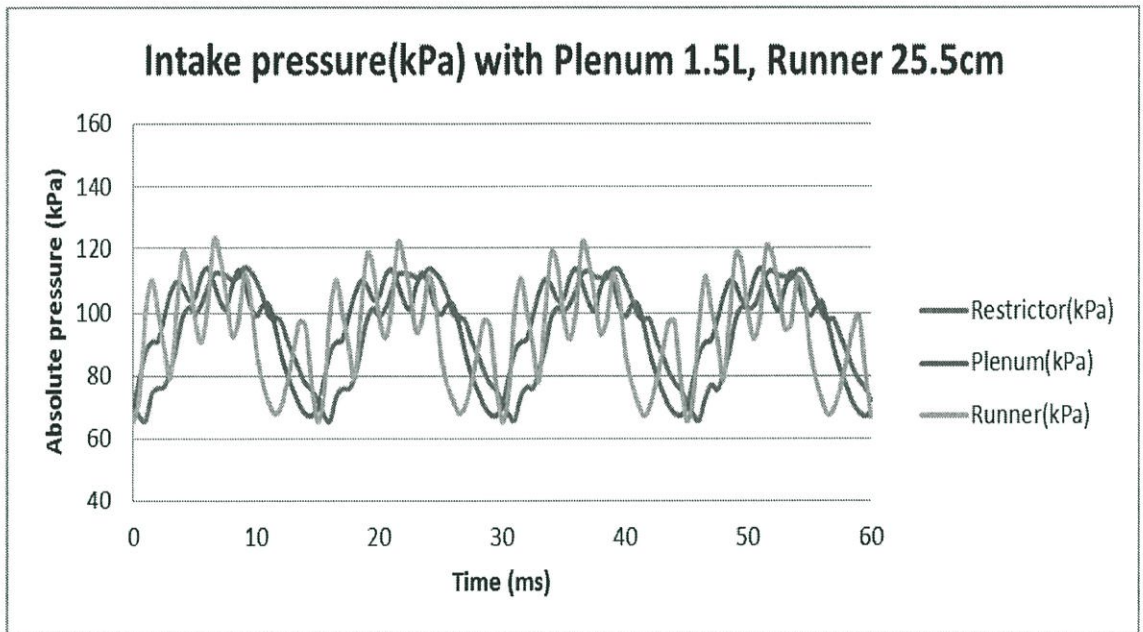
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

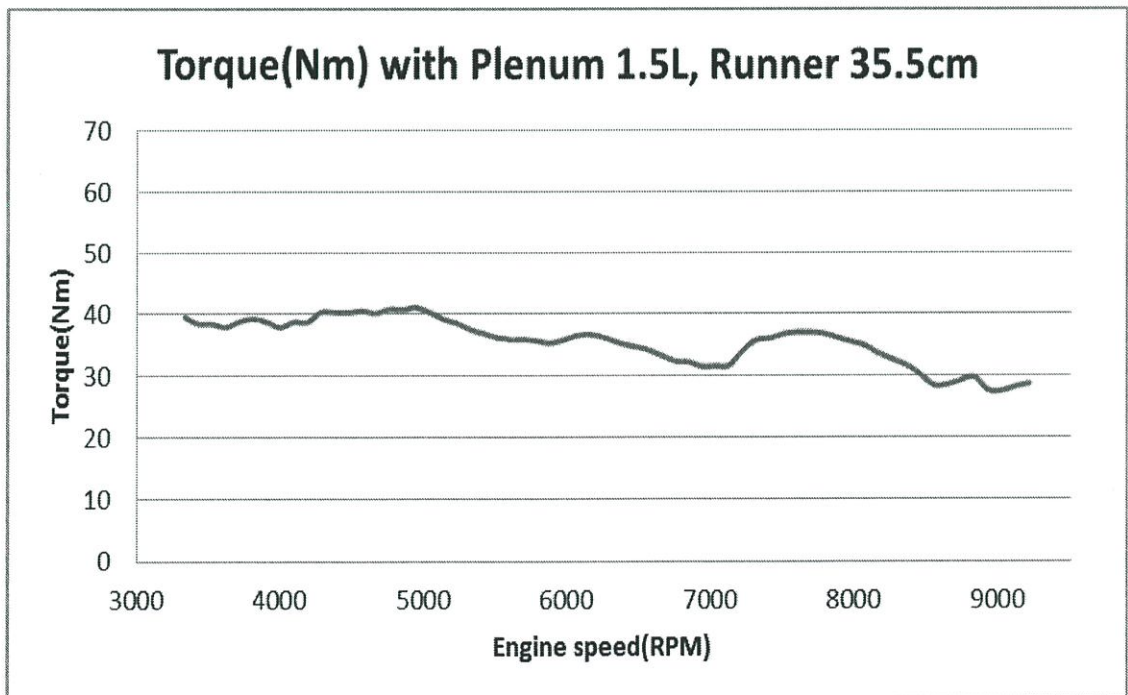


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

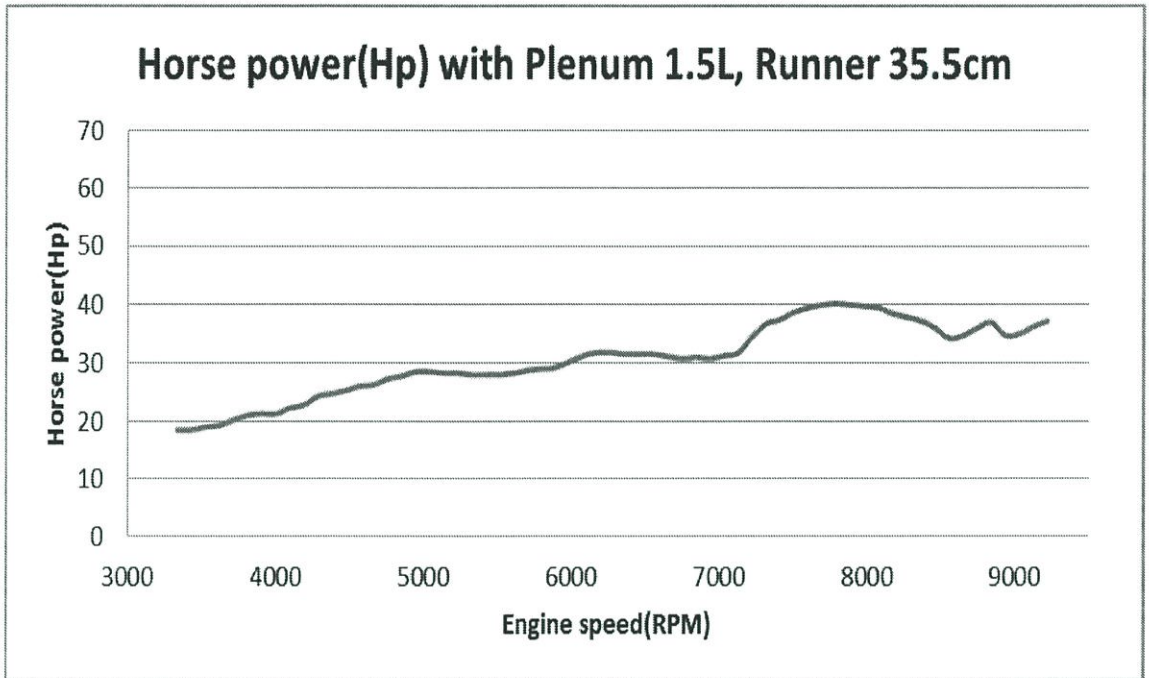


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

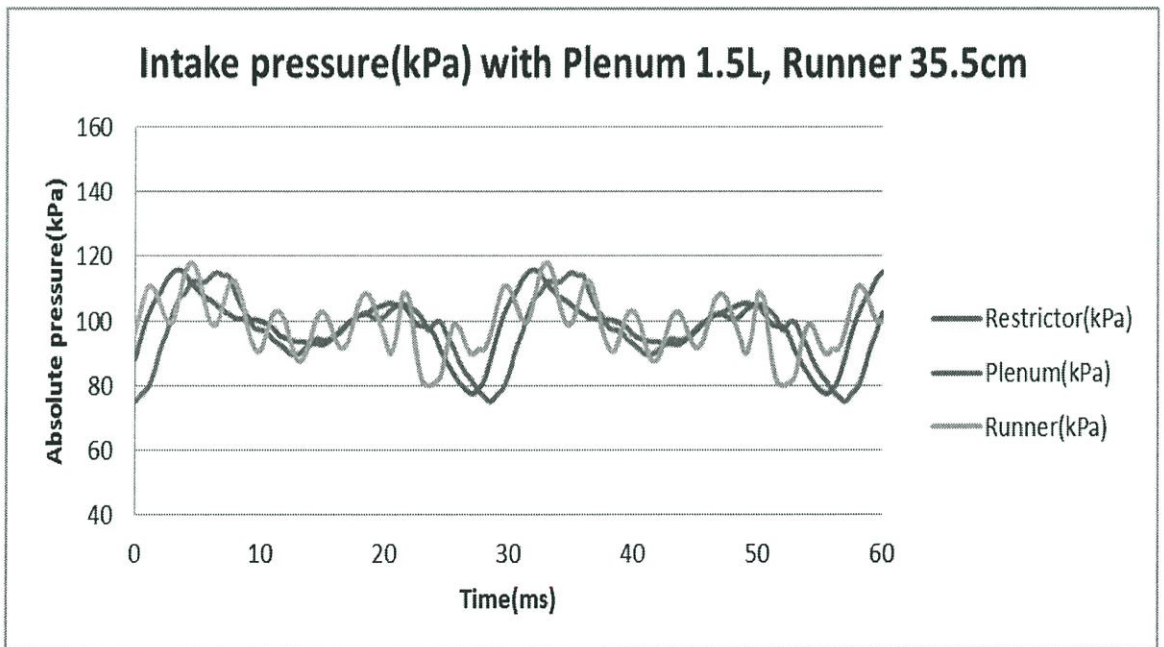
กรณีที่ 6 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



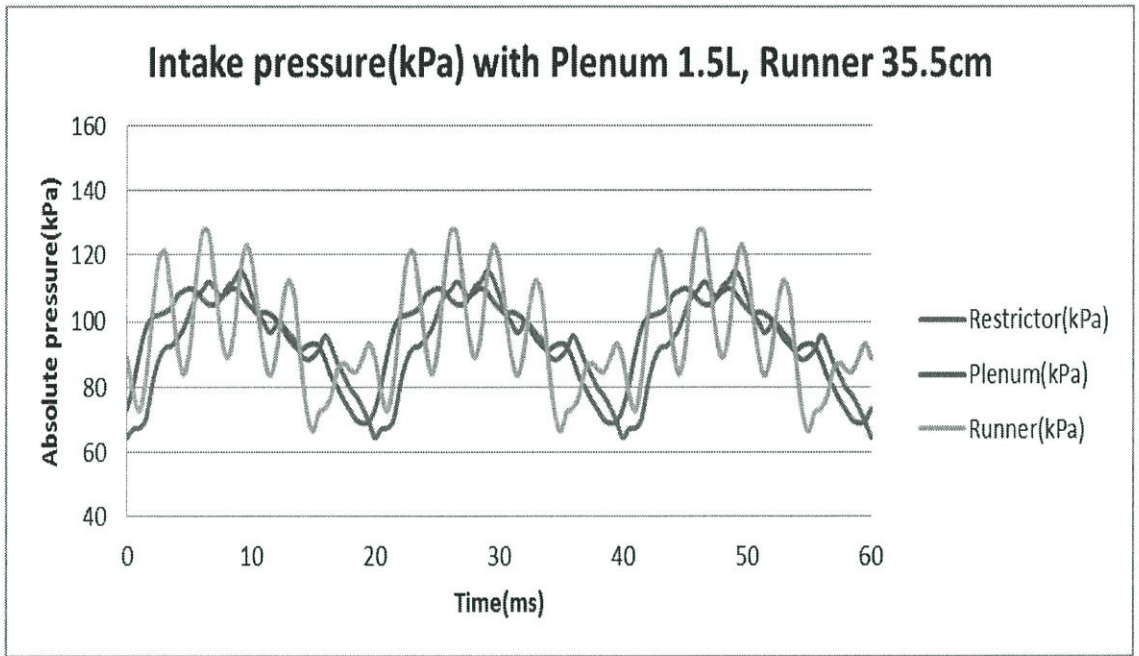
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



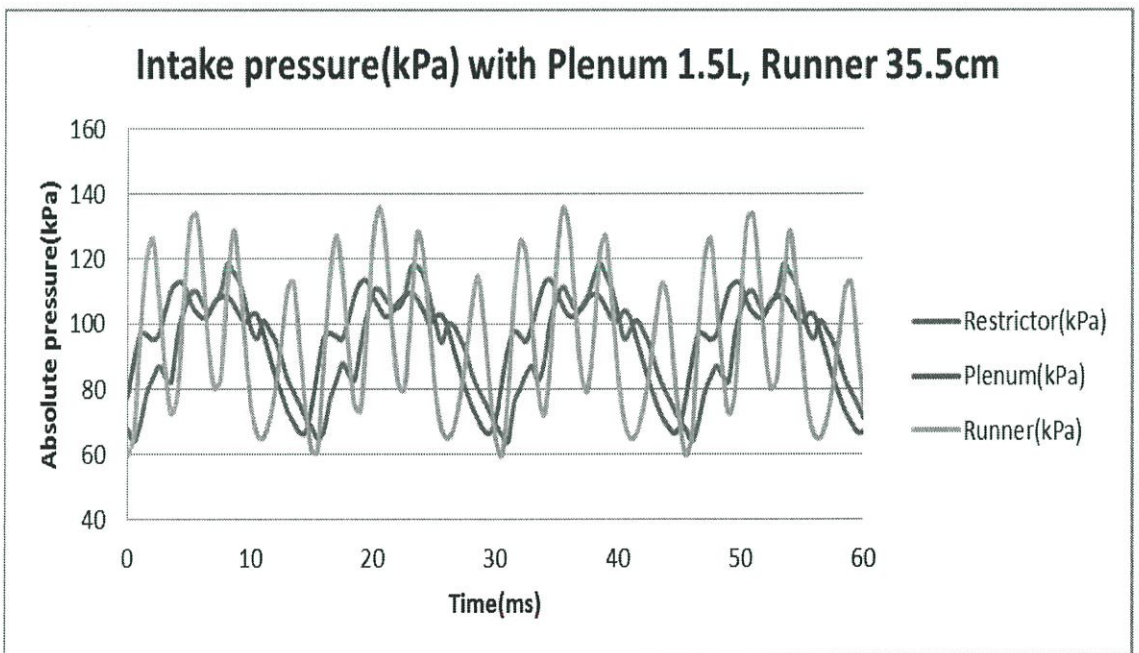
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

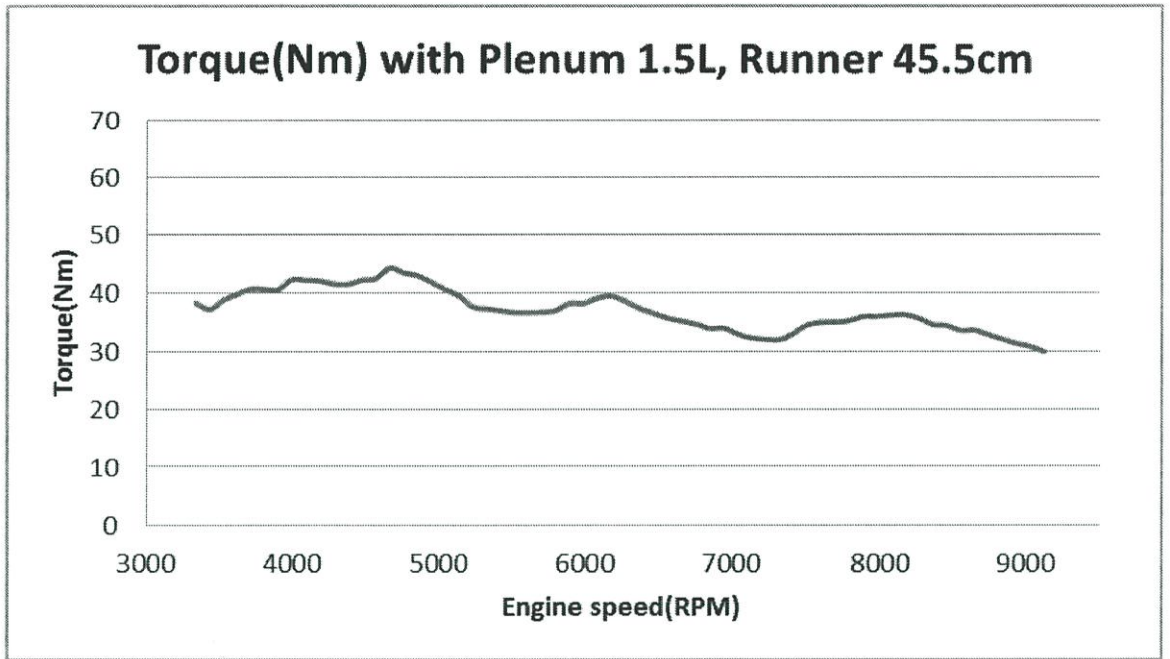


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

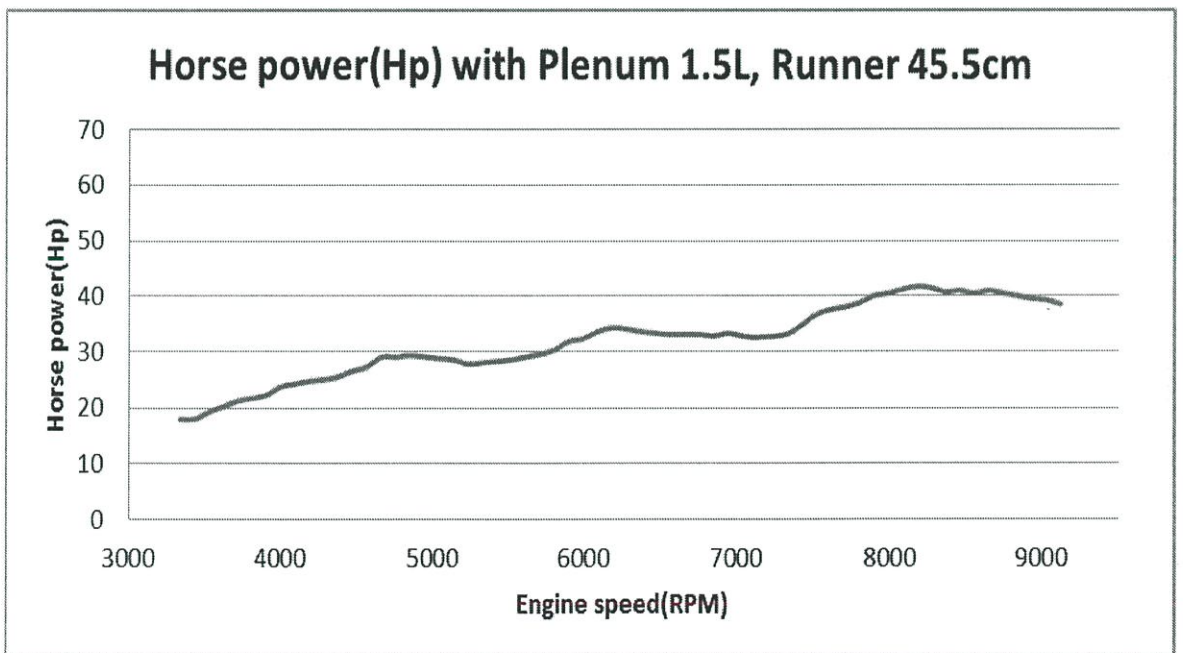


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

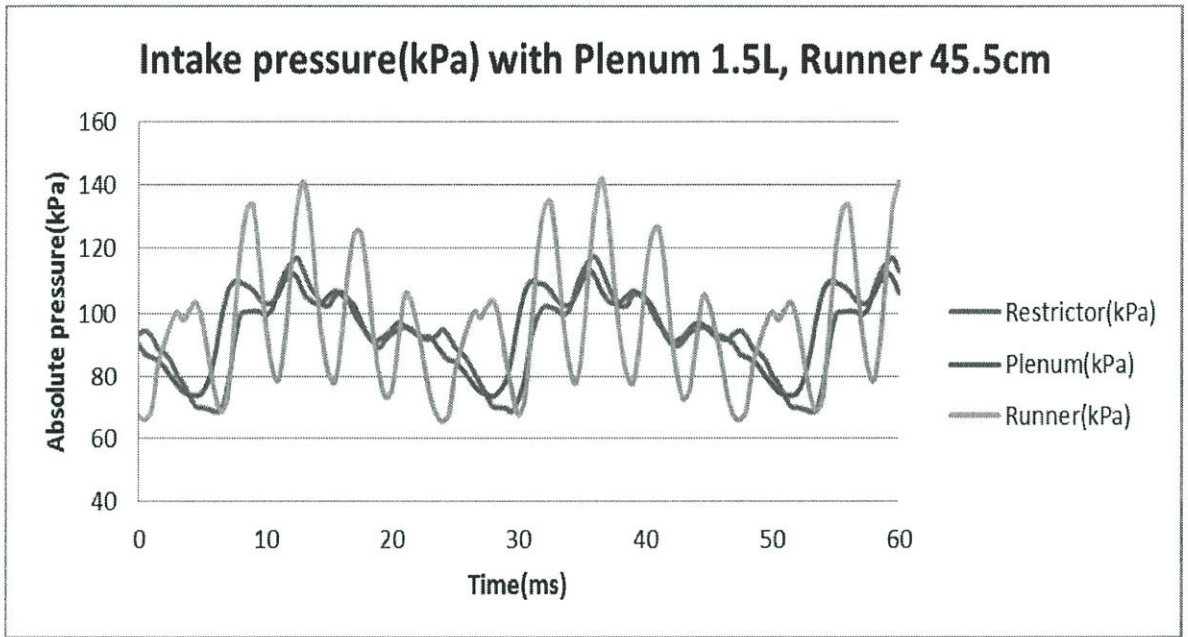
กรณีที่ 7 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



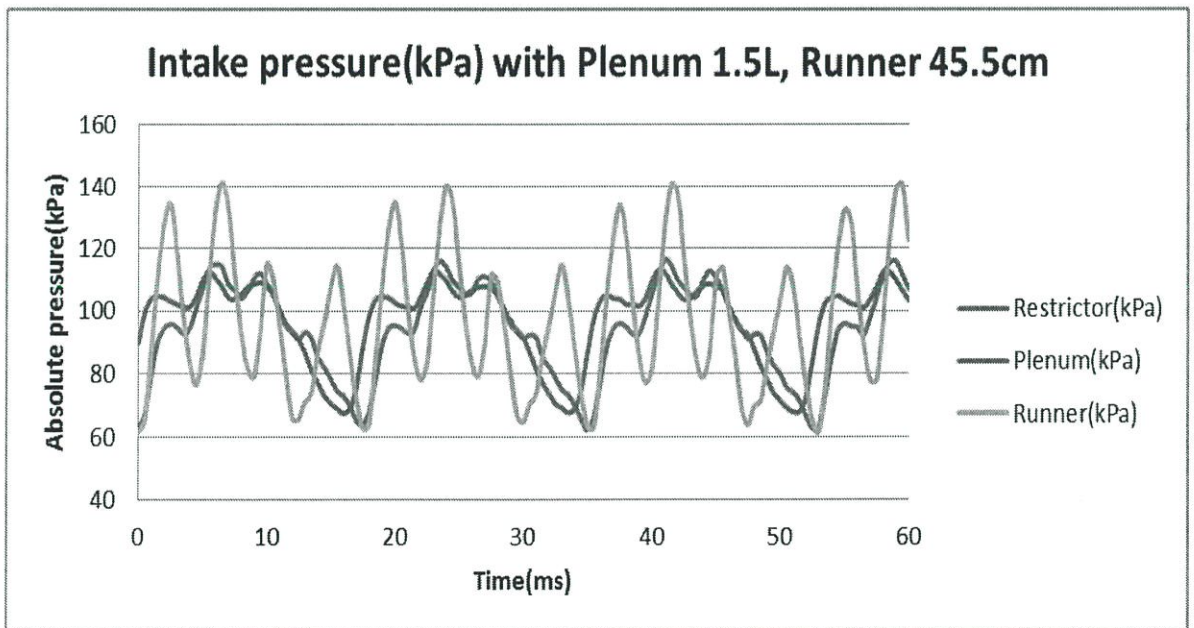
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



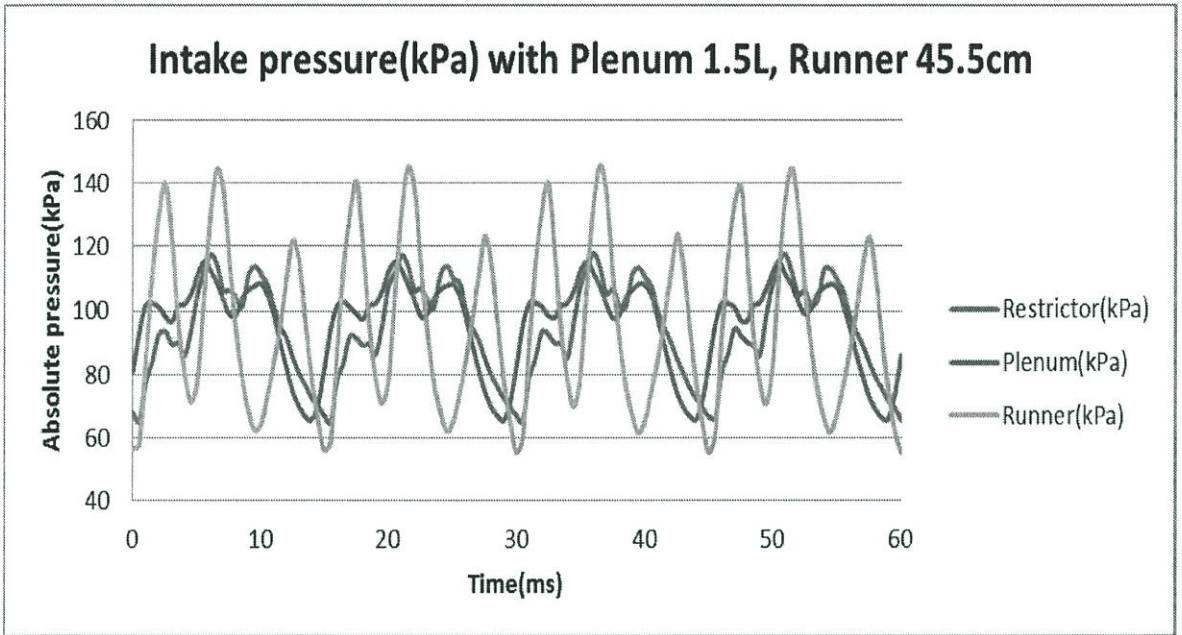
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

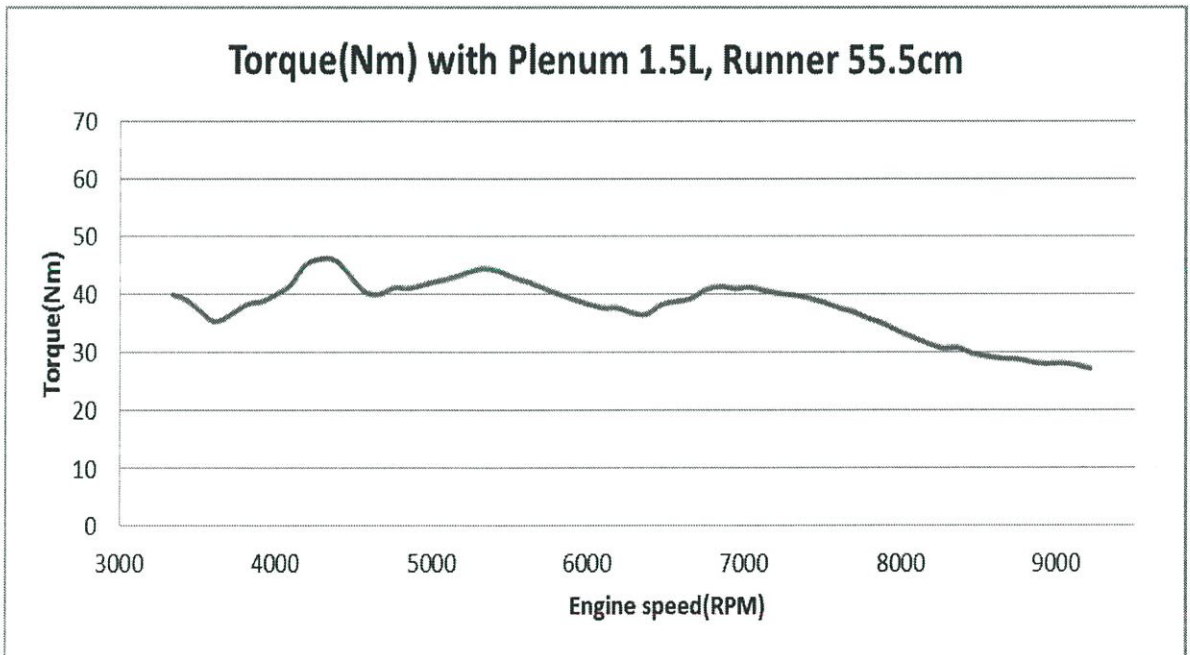


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

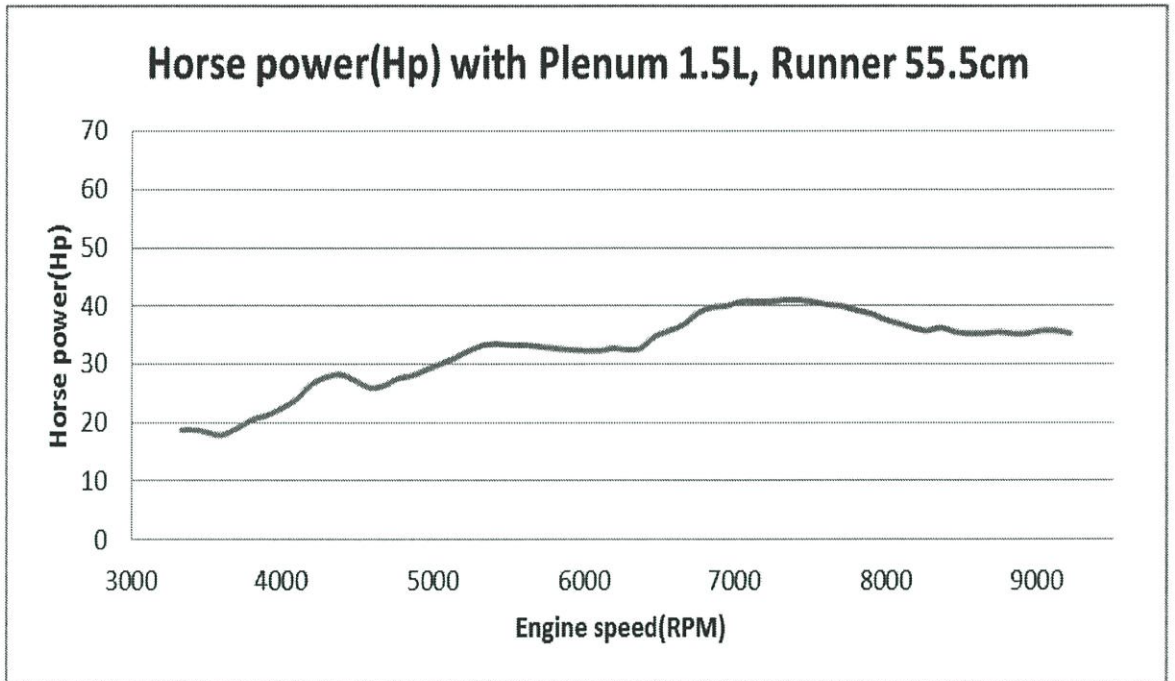


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

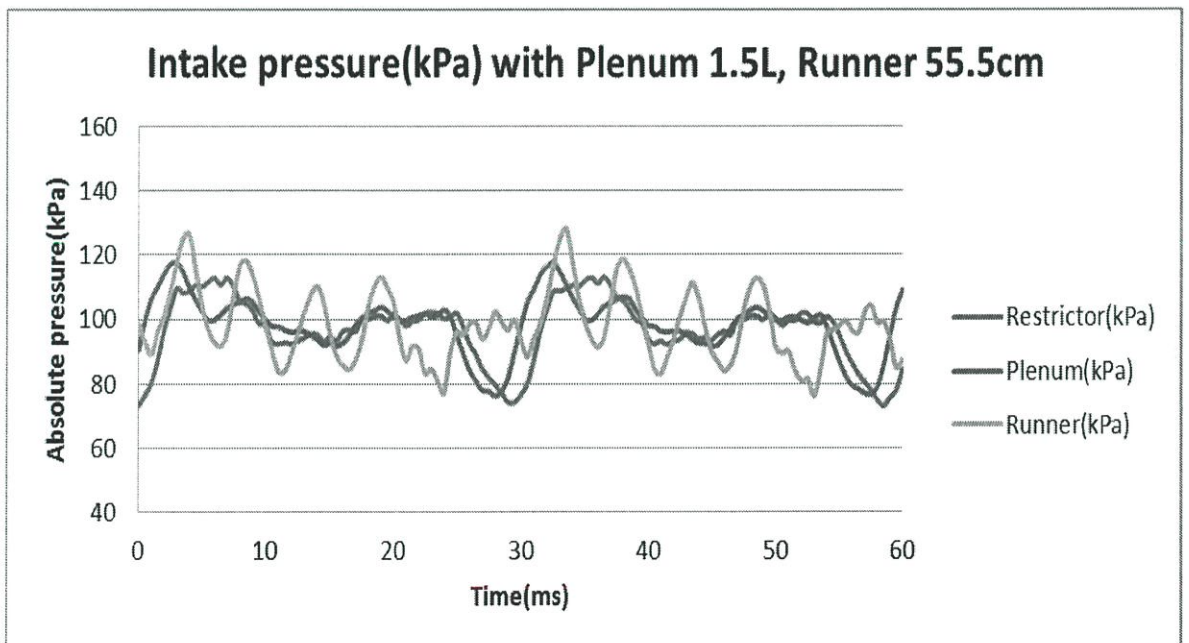
กรณีที่ 8 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



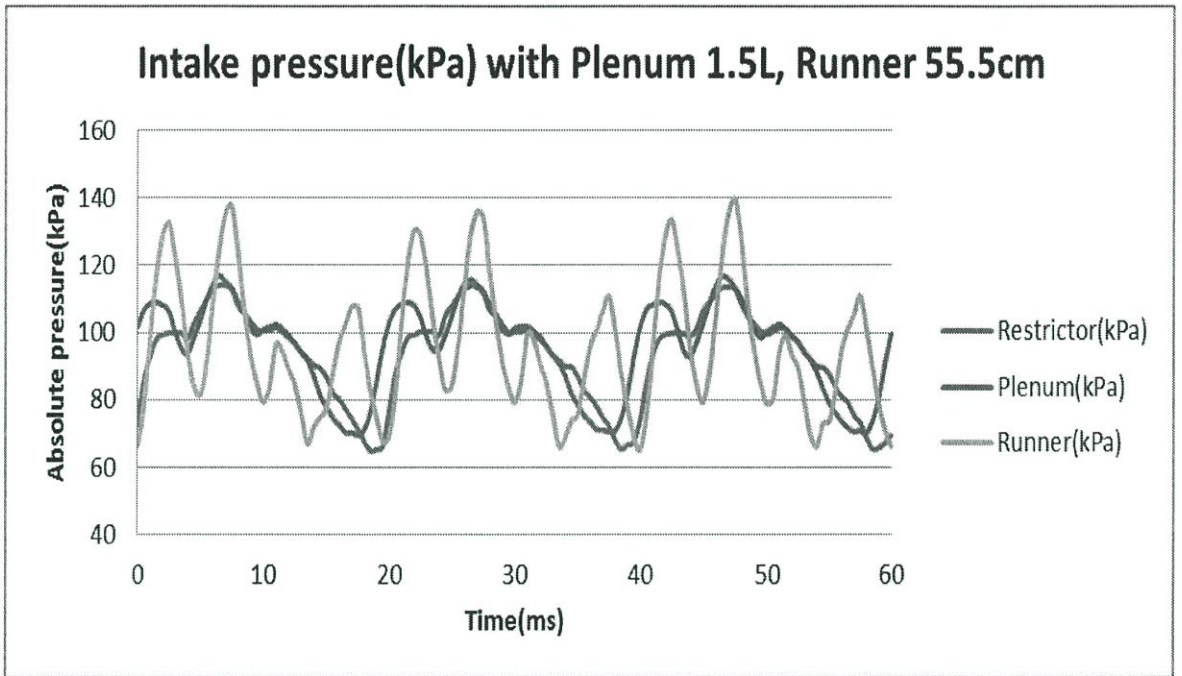
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



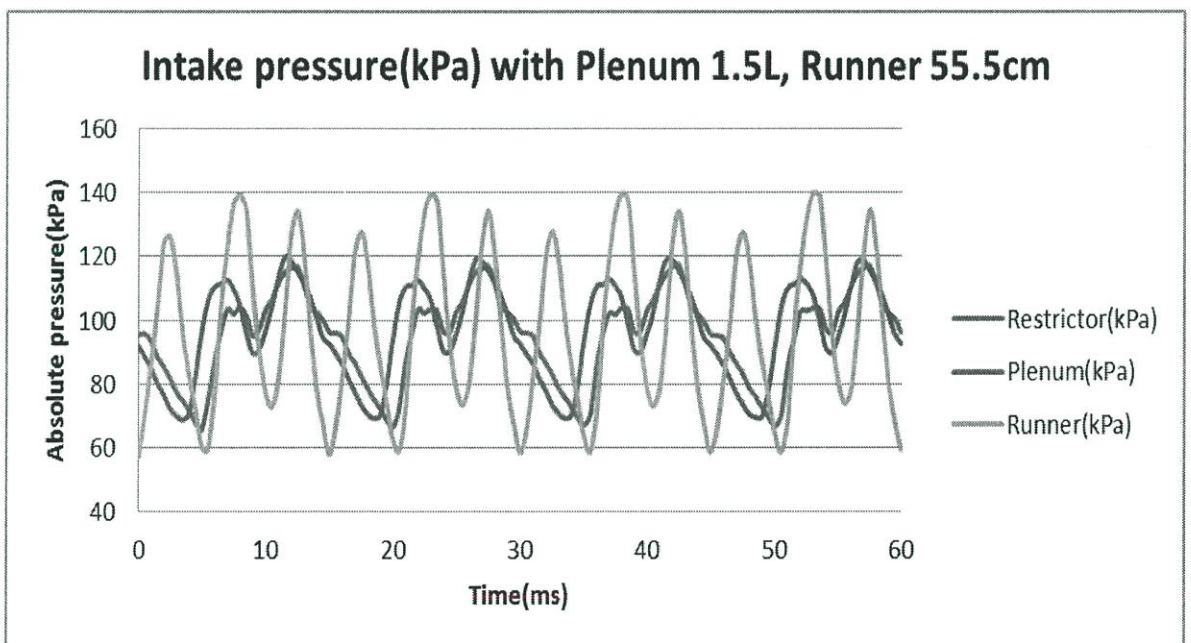
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 1.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

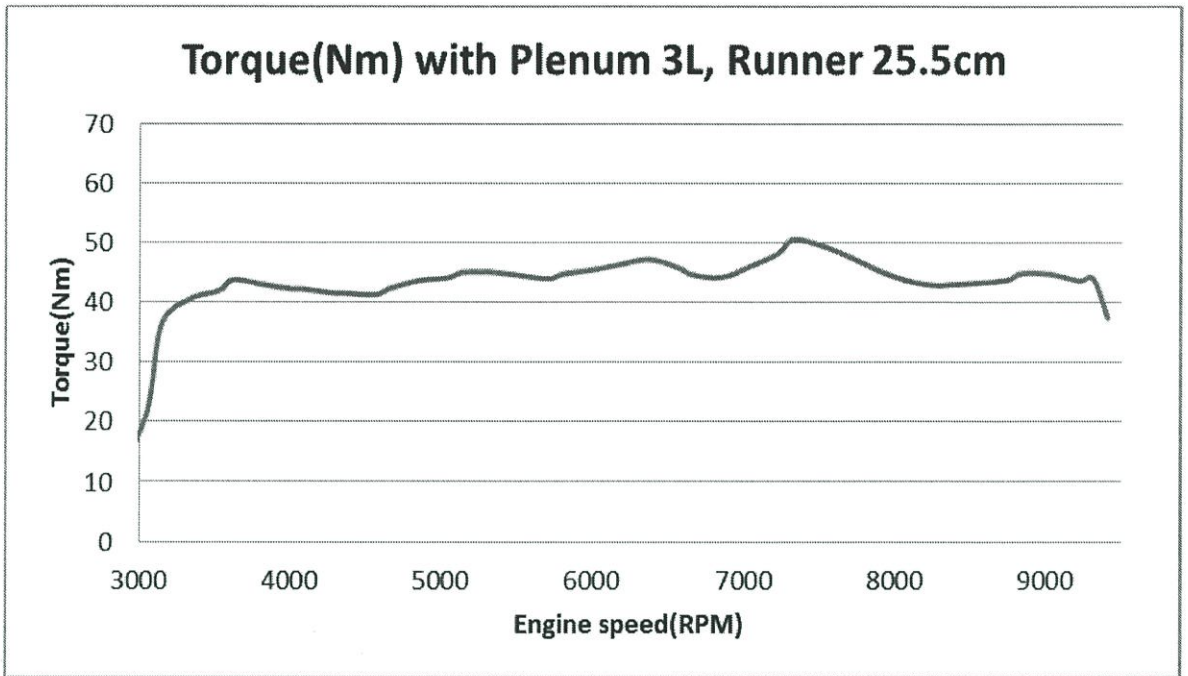


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

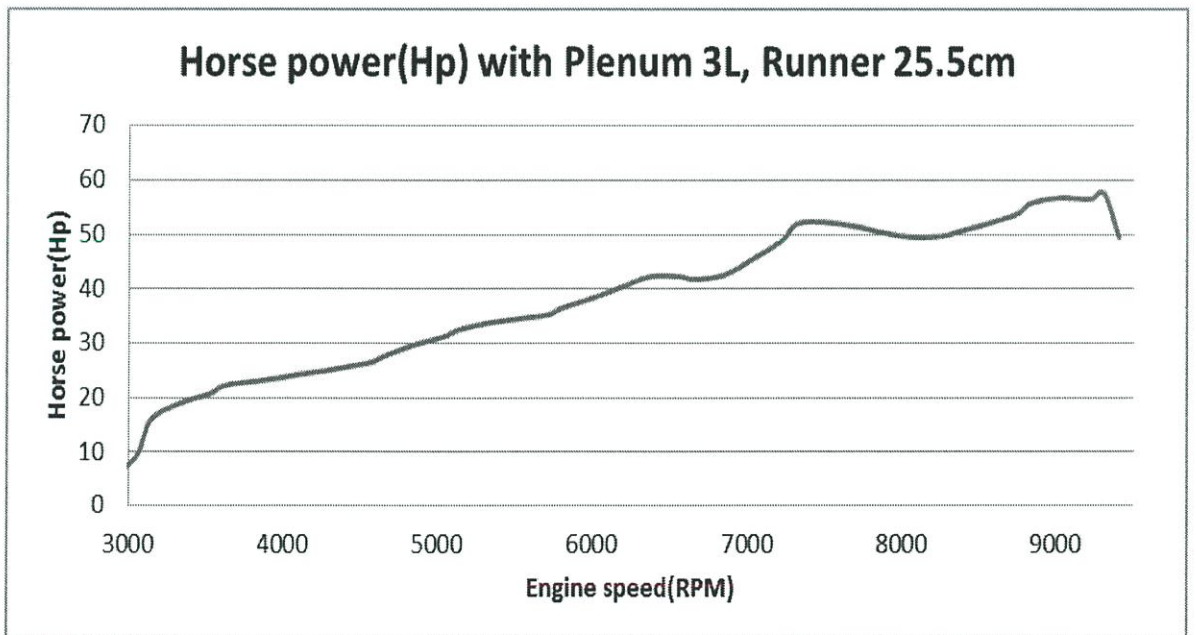


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

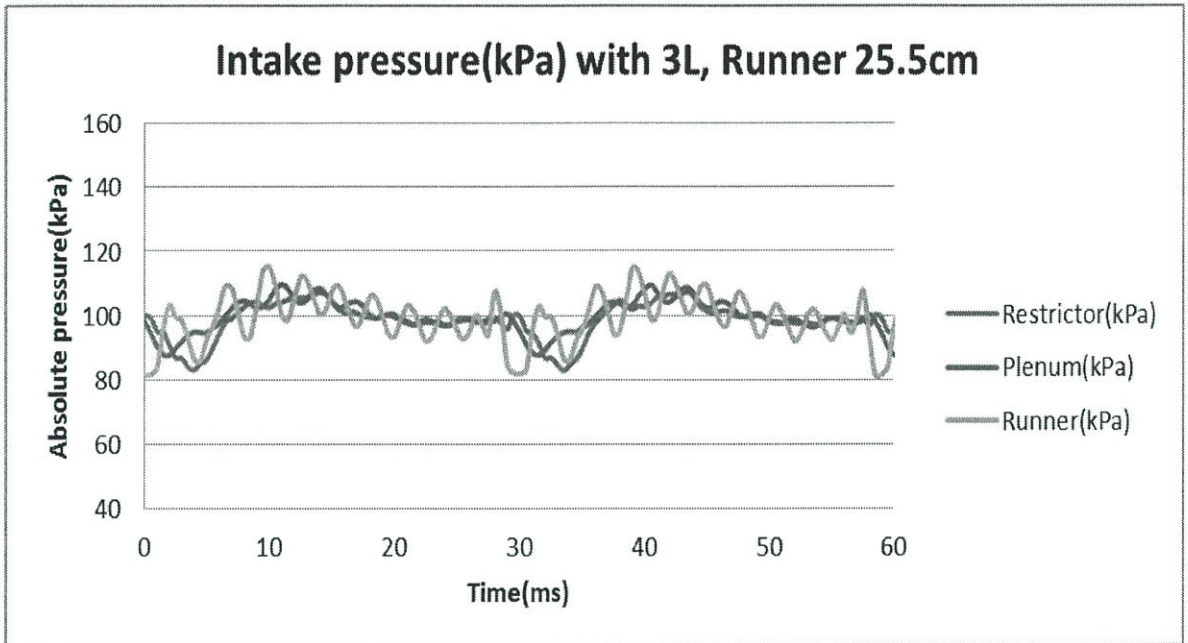
กรณีที่ 9 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



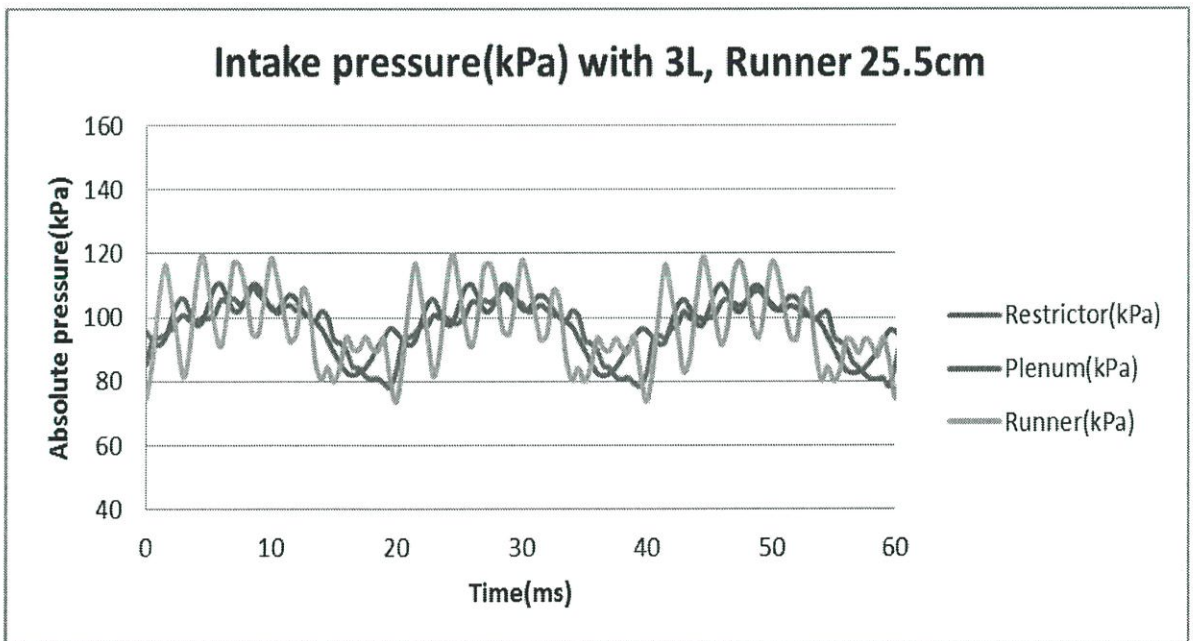
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



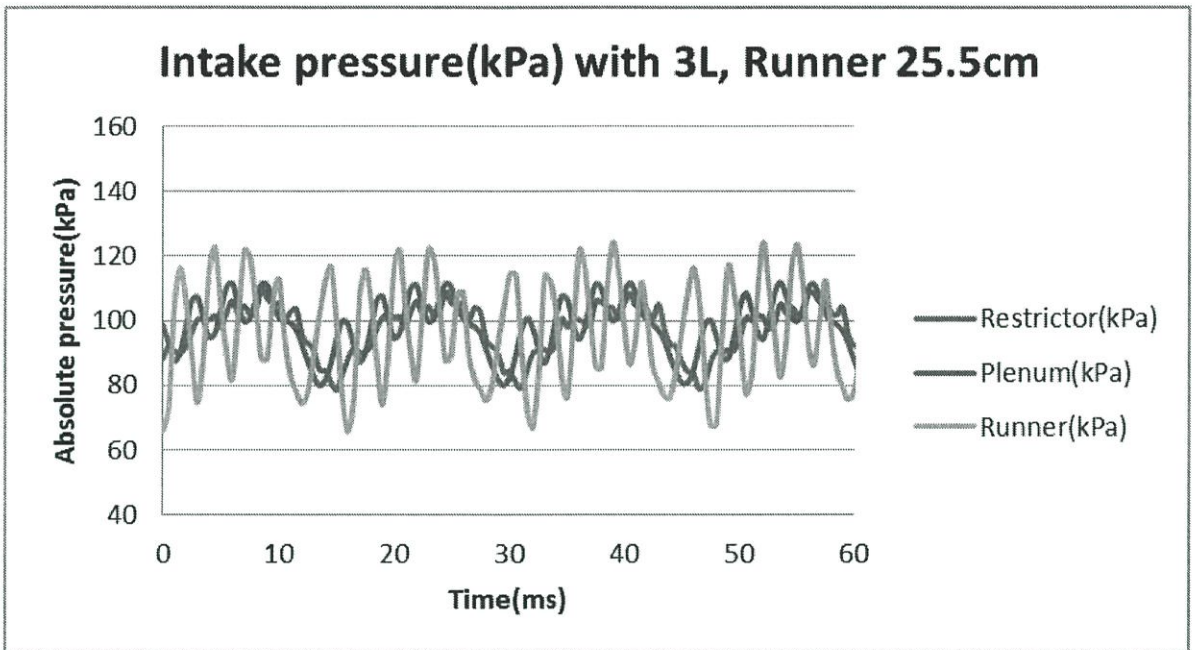
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

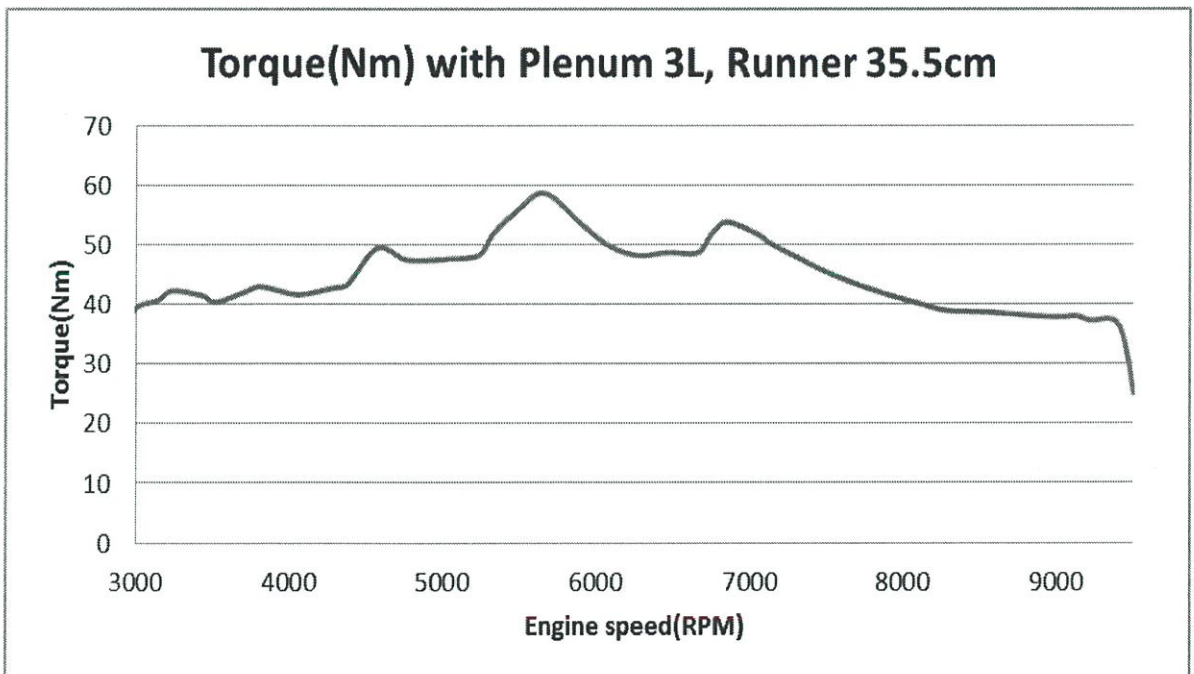


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

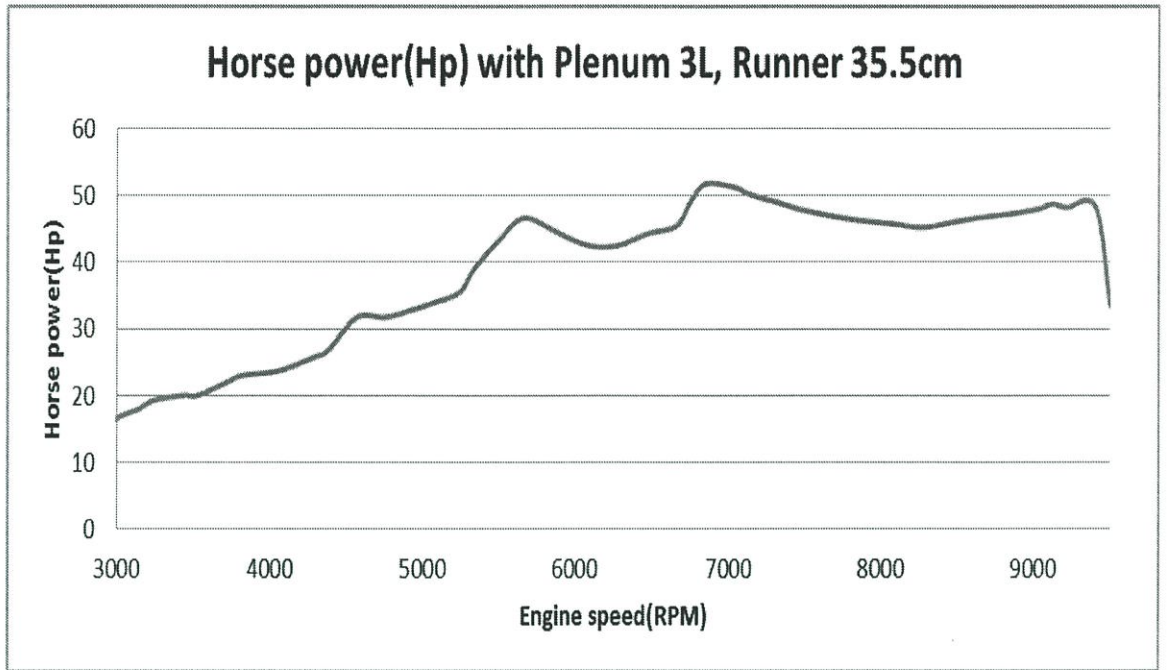


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

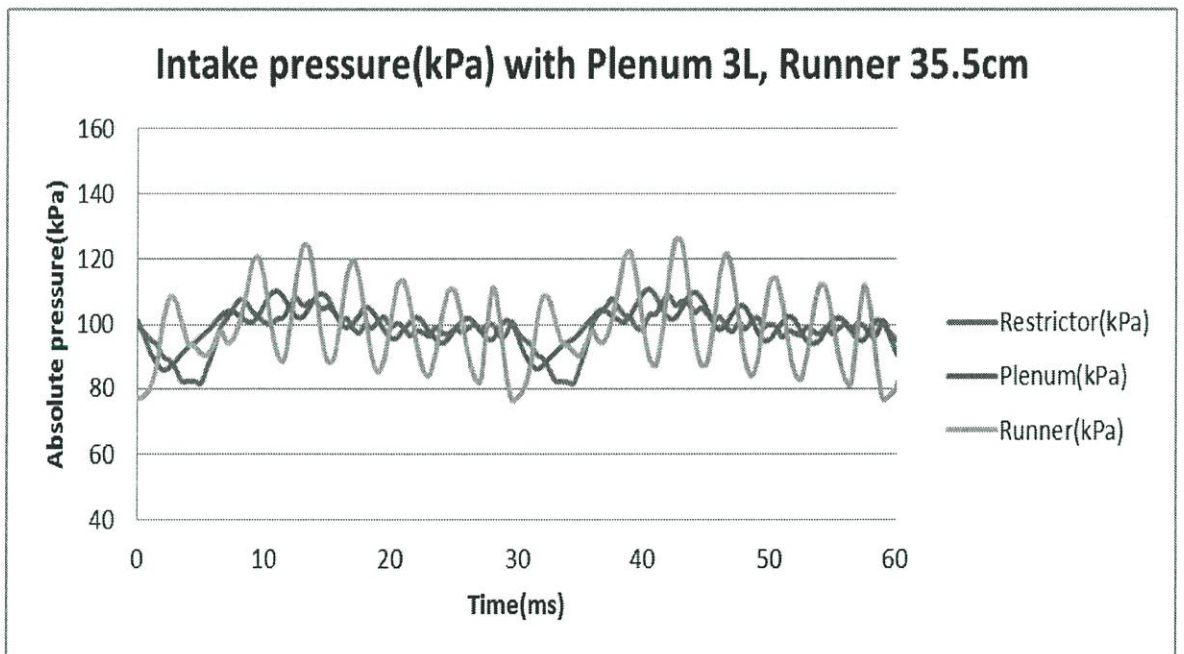
กรณีที่ 10 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



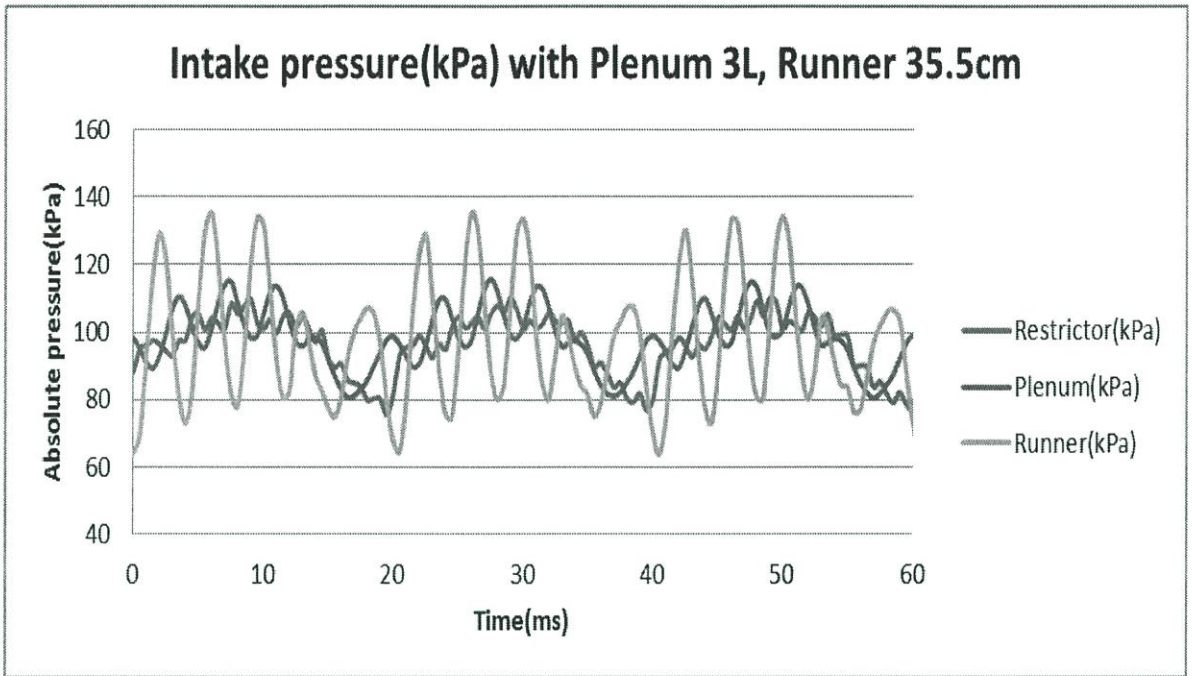
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



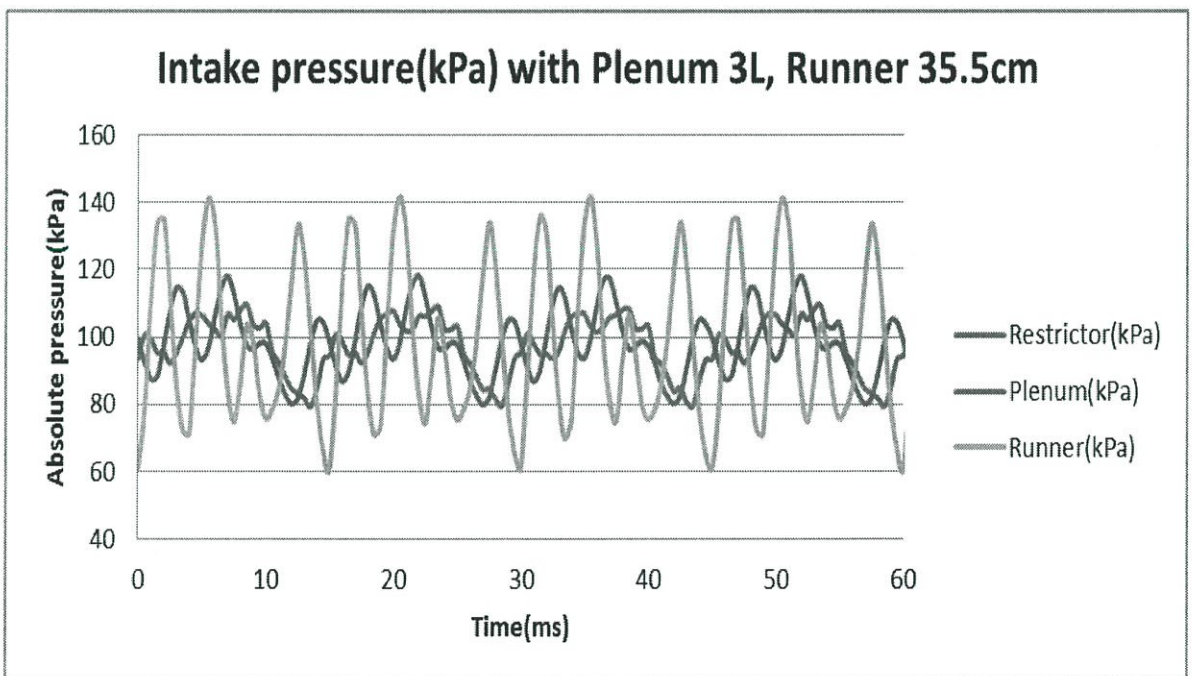
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

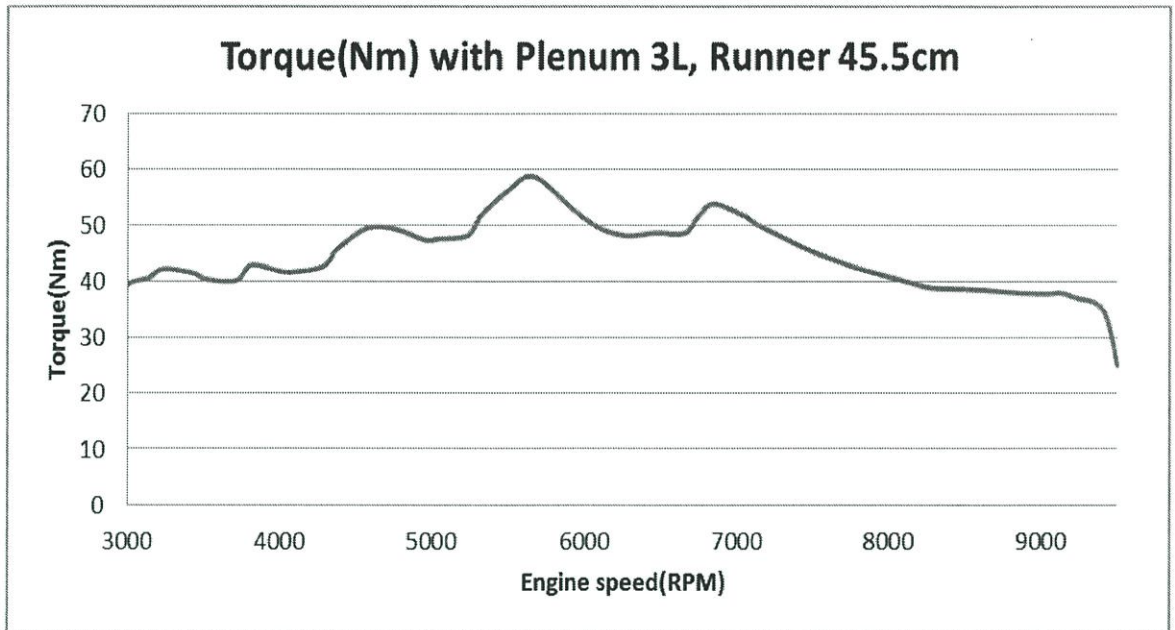


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

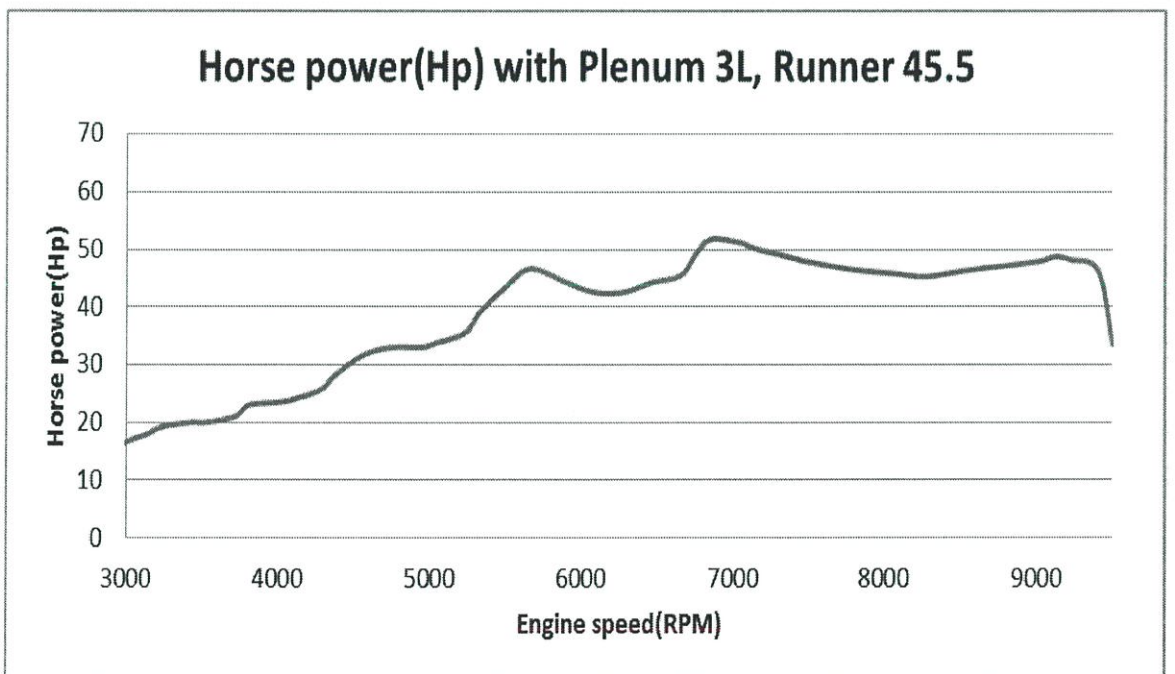


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

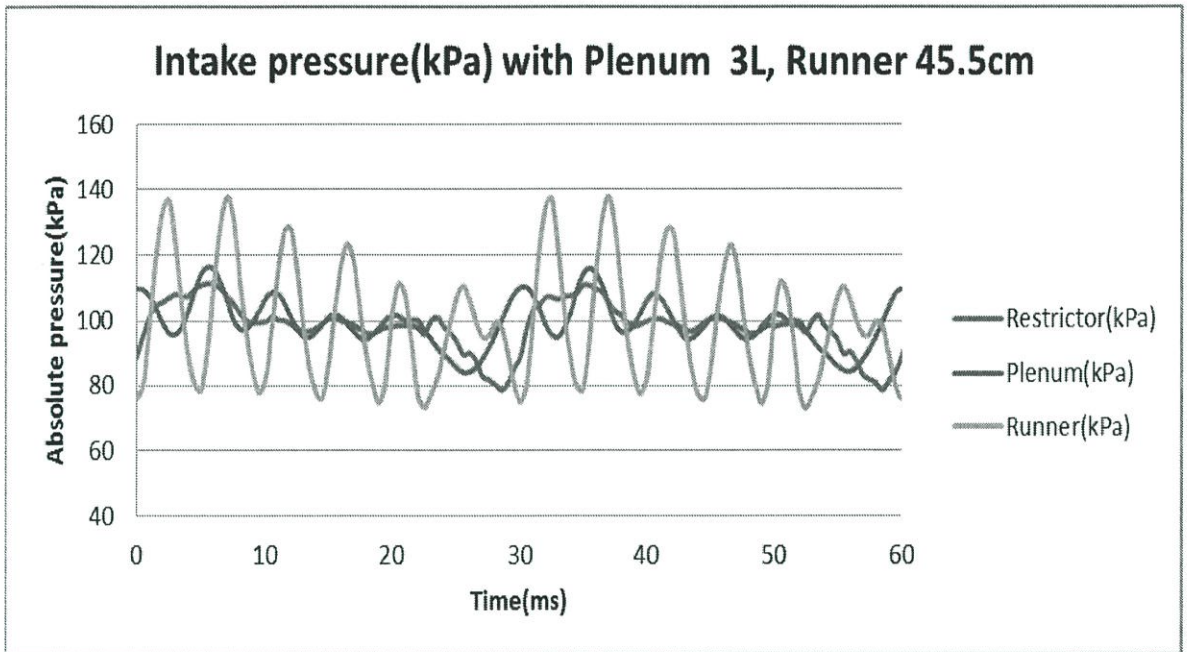
กรณีที่ 11 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



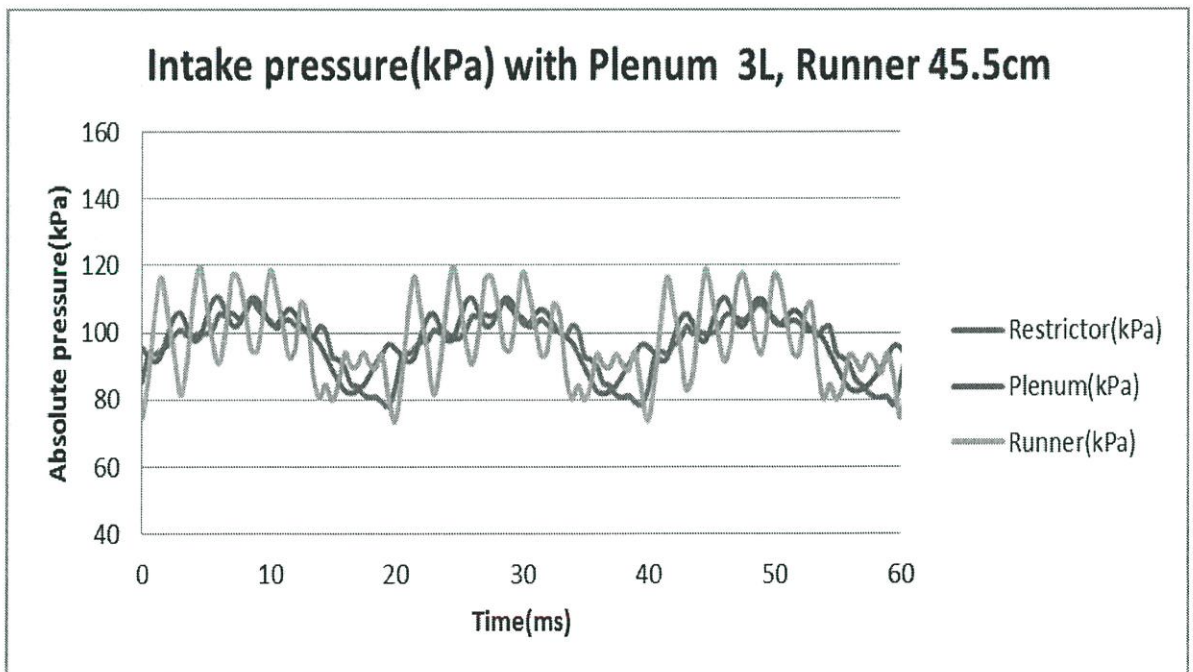
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



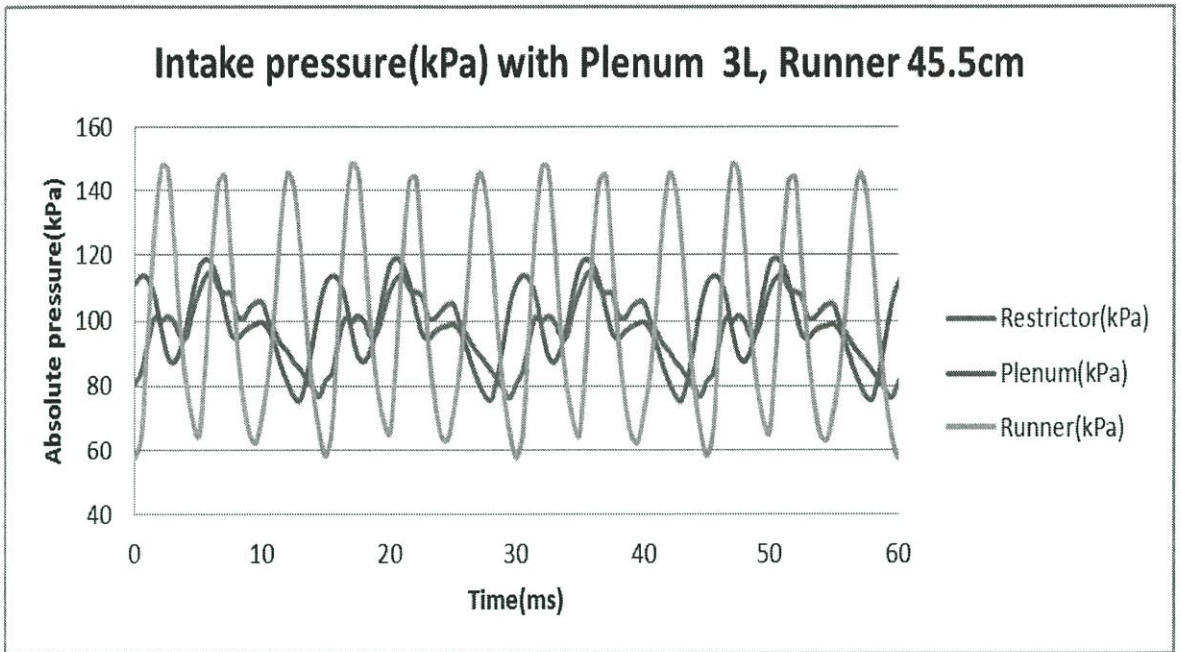
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดี ในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

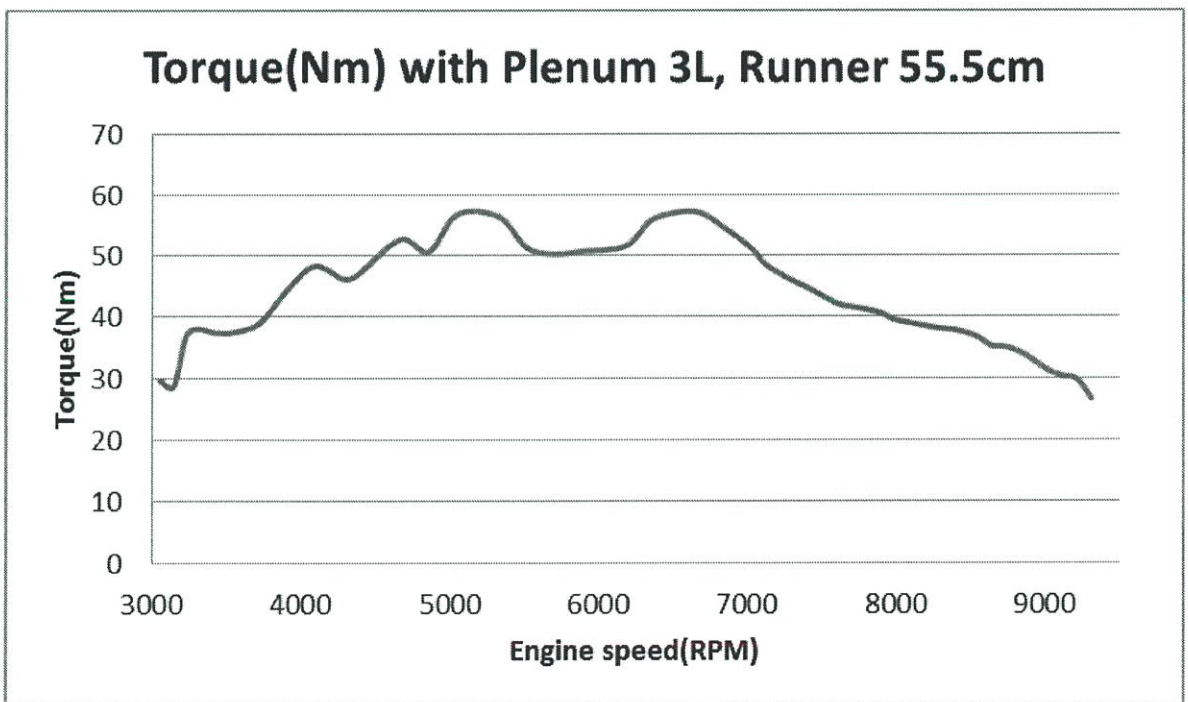


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

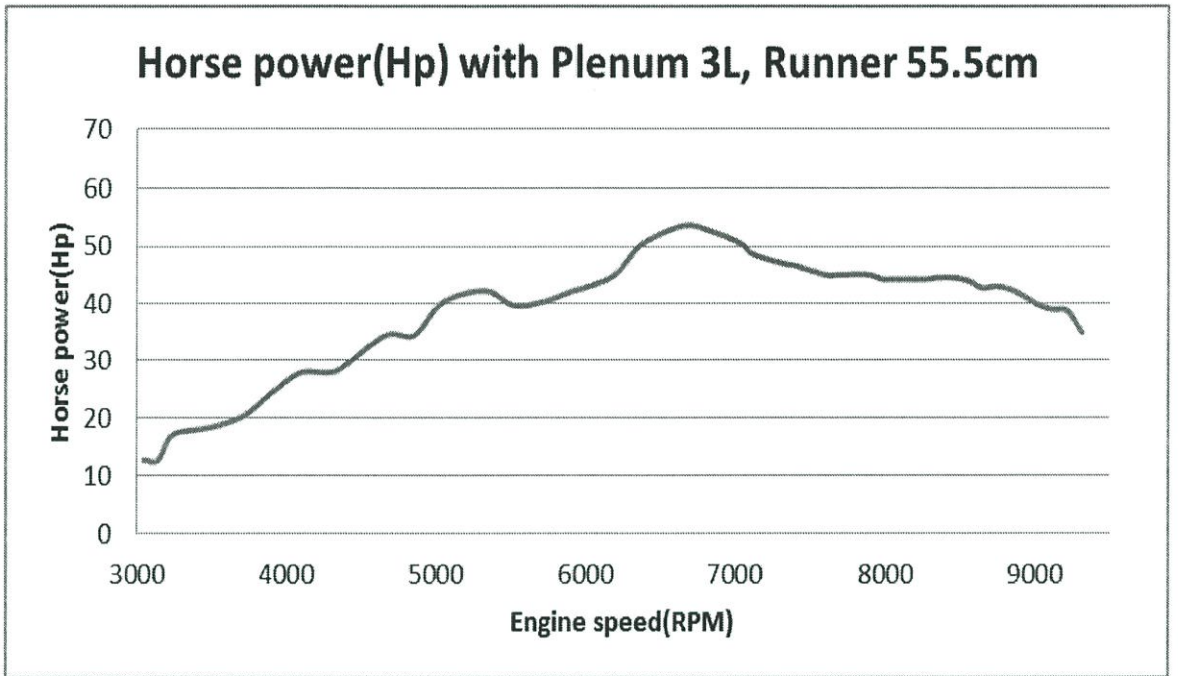


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

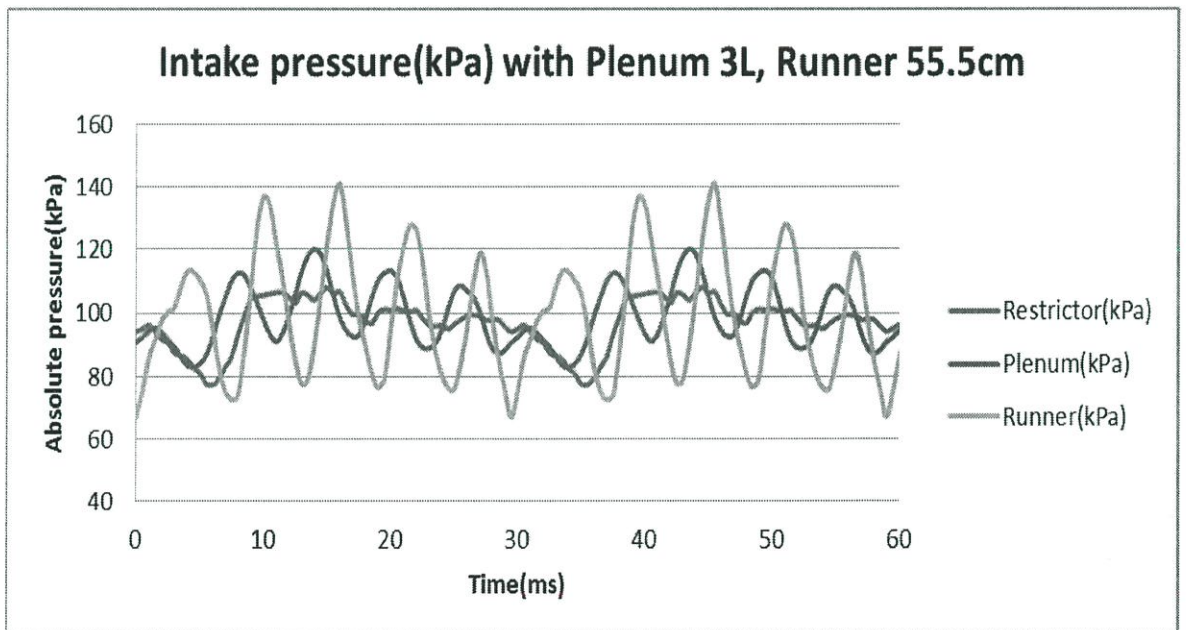
กรณีที่ 12 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



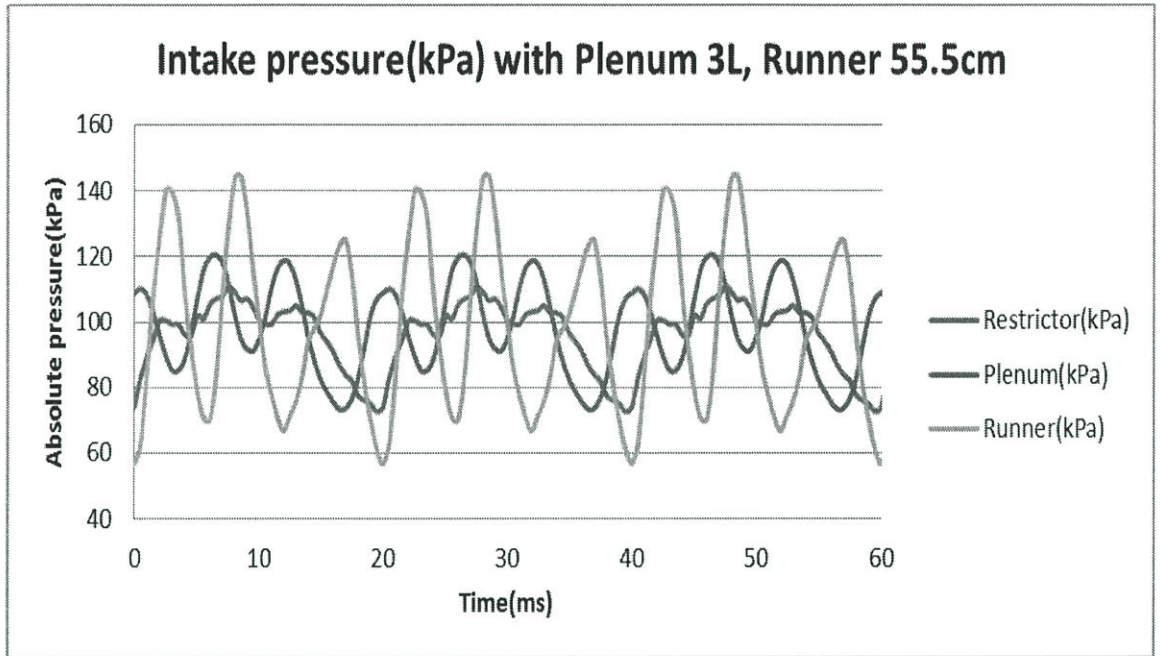
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



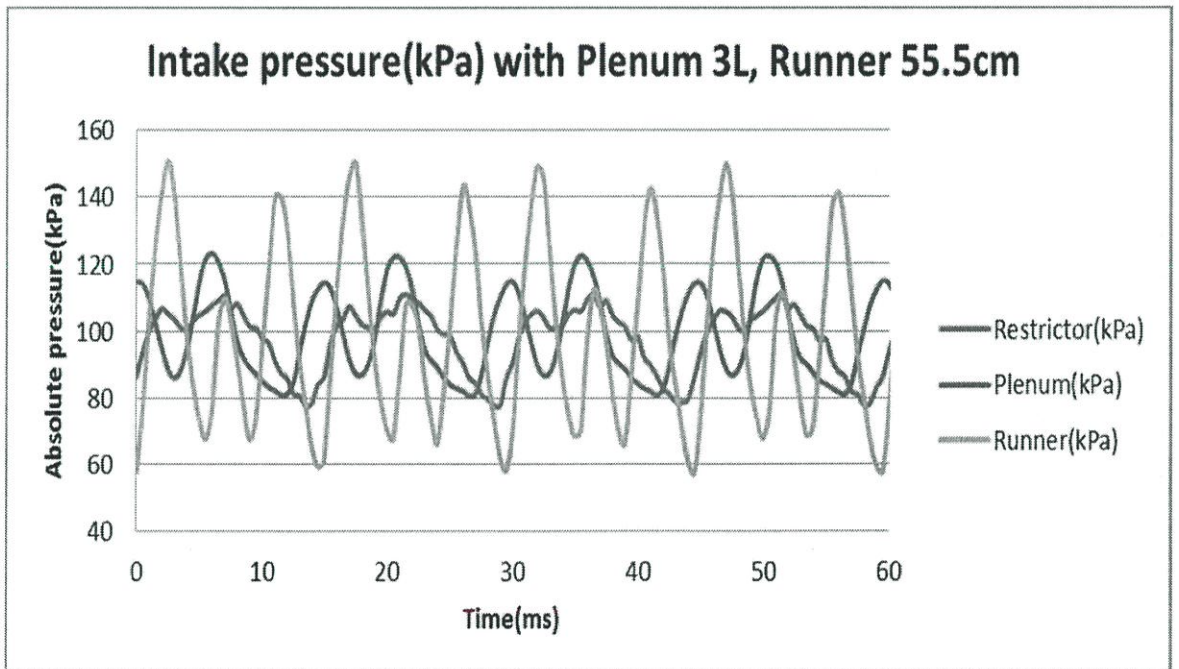
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 3 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

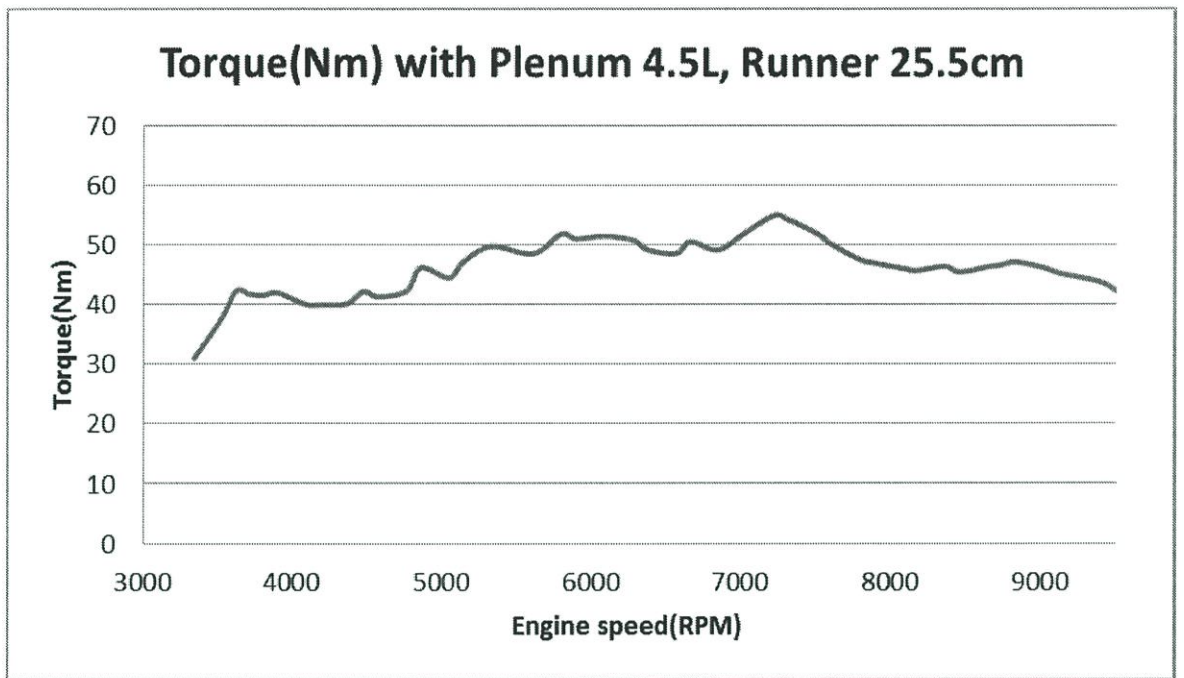


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

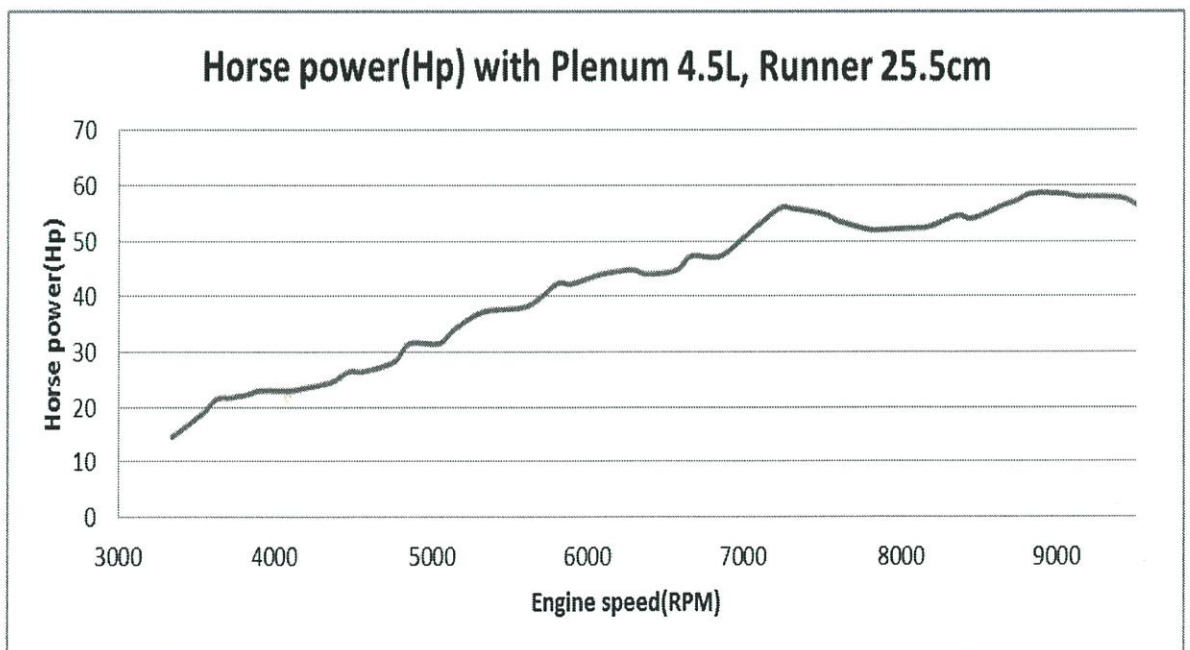


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

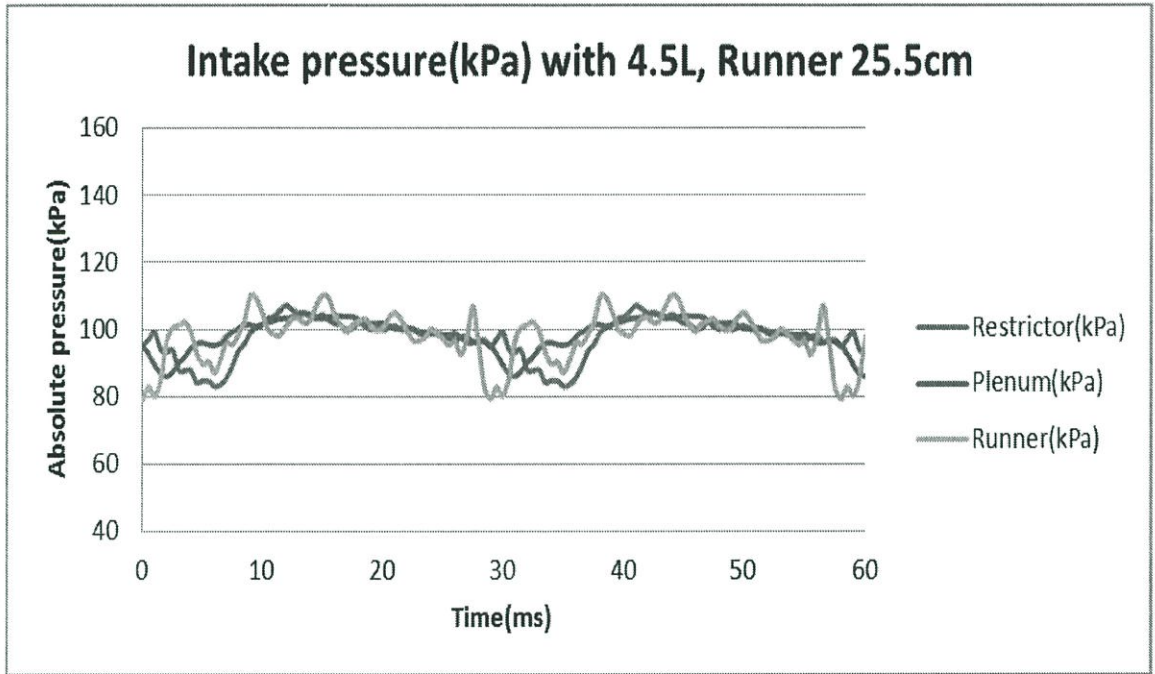
กรณี 13 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



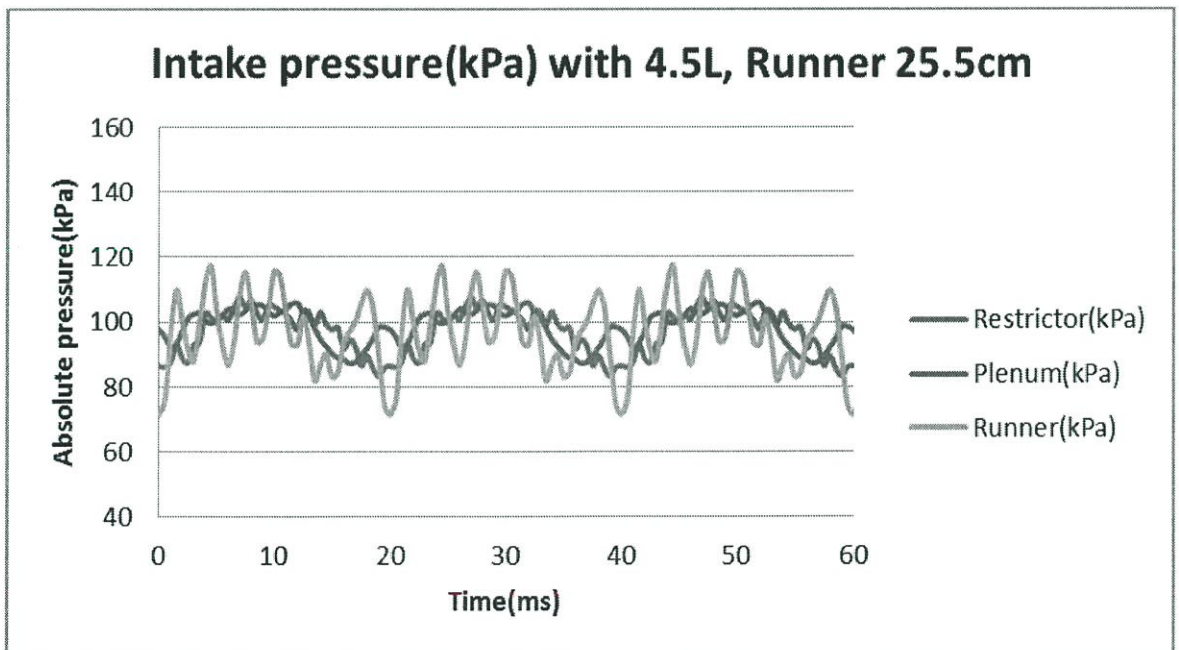
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



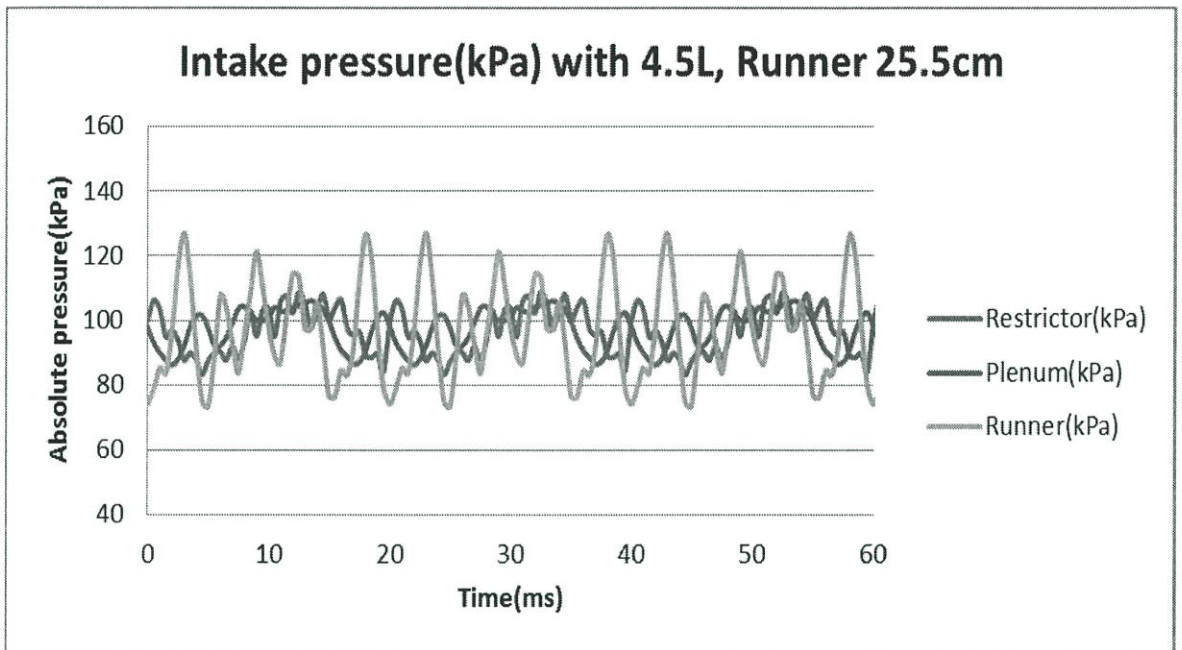
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

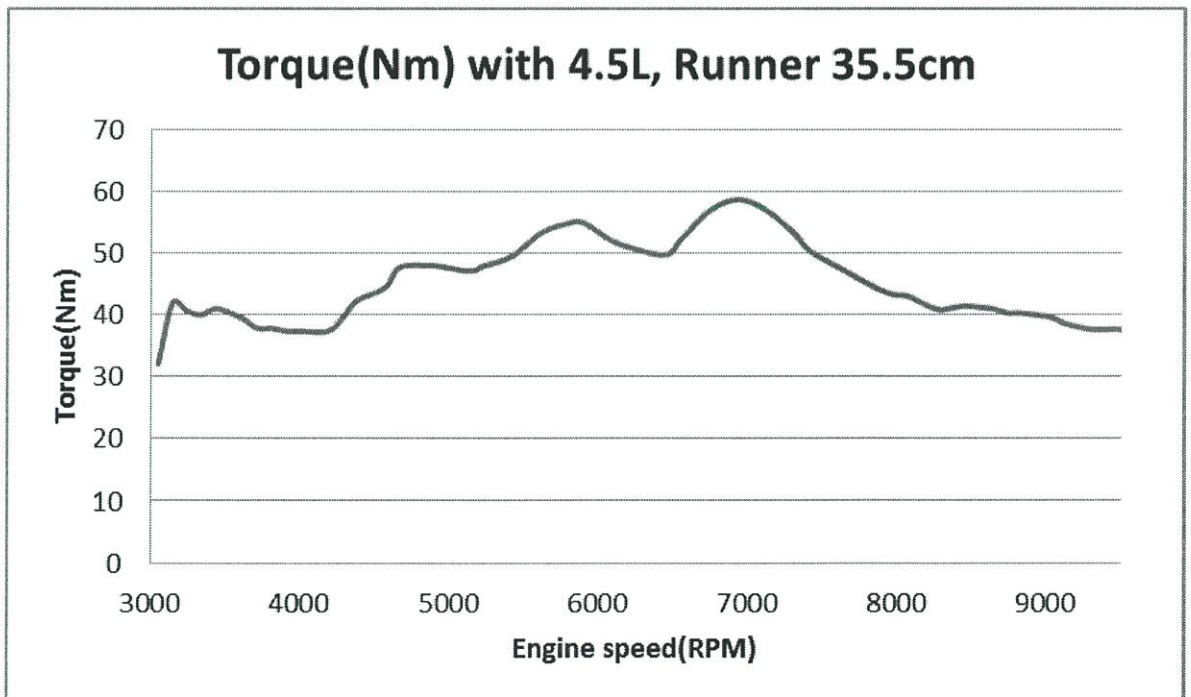


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

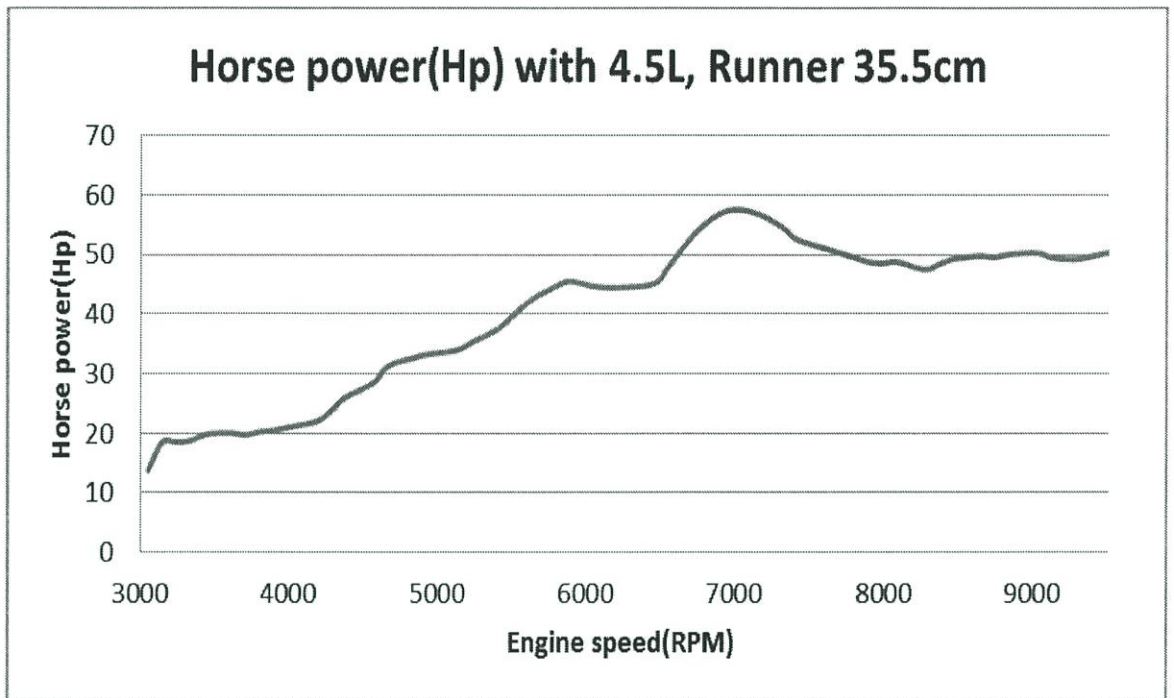


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

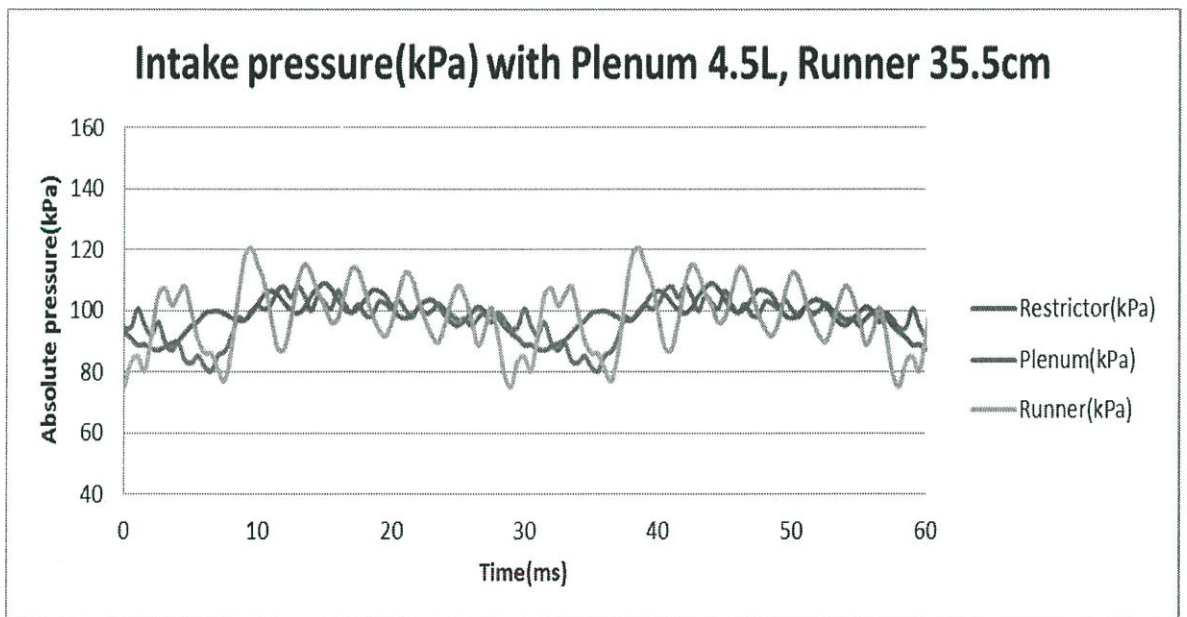
กรณีที่ 14 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



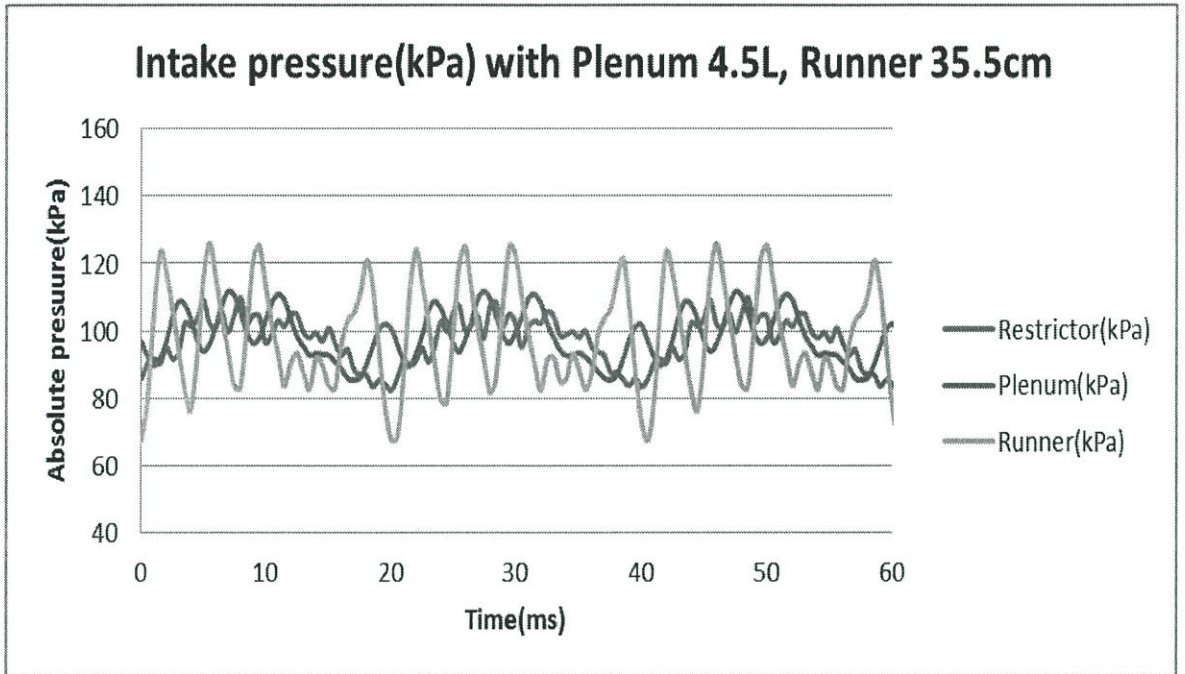
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



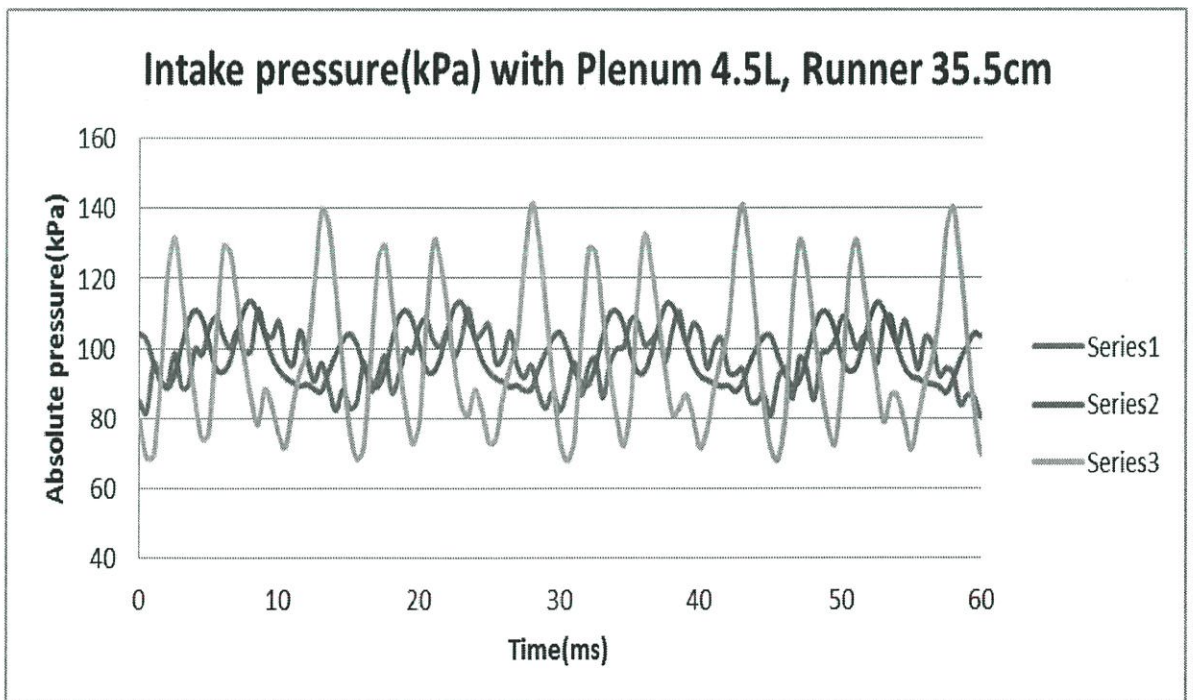
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอตี 35.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอตีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอตี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

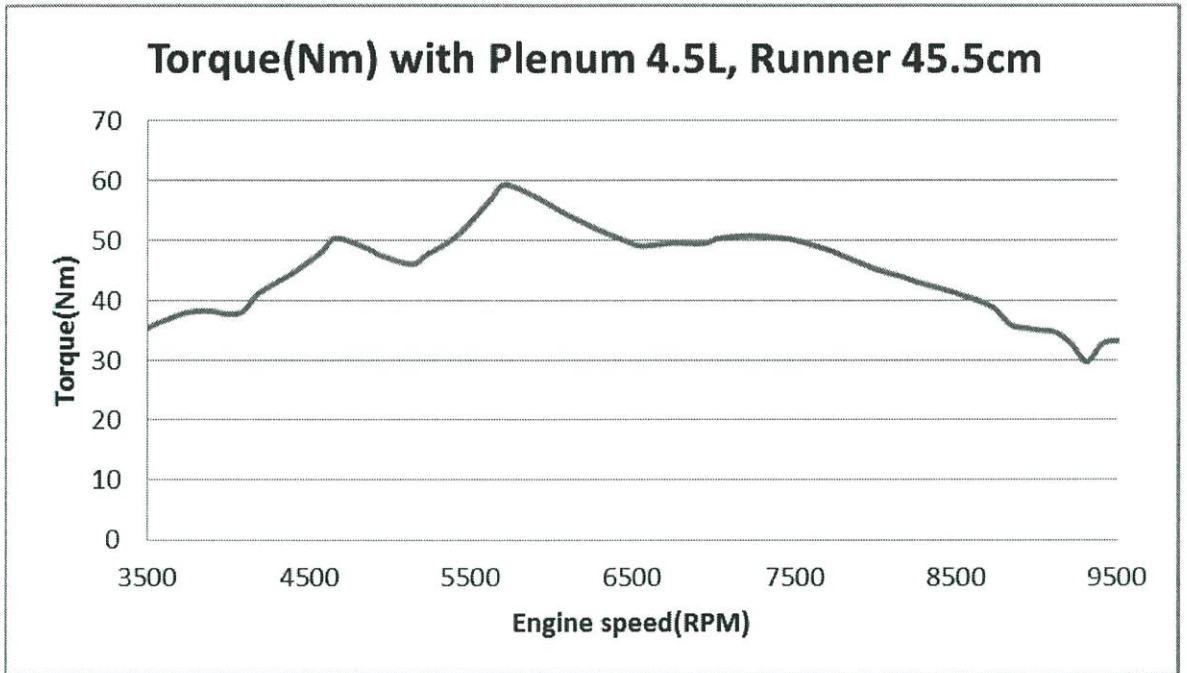


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

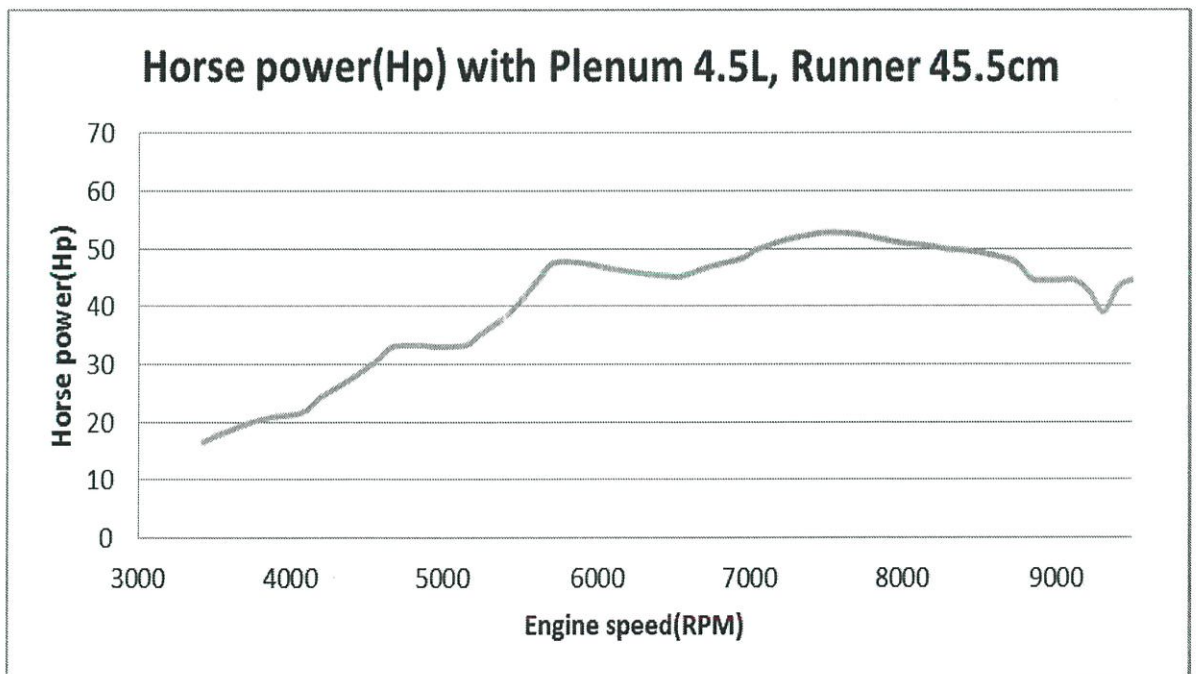


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

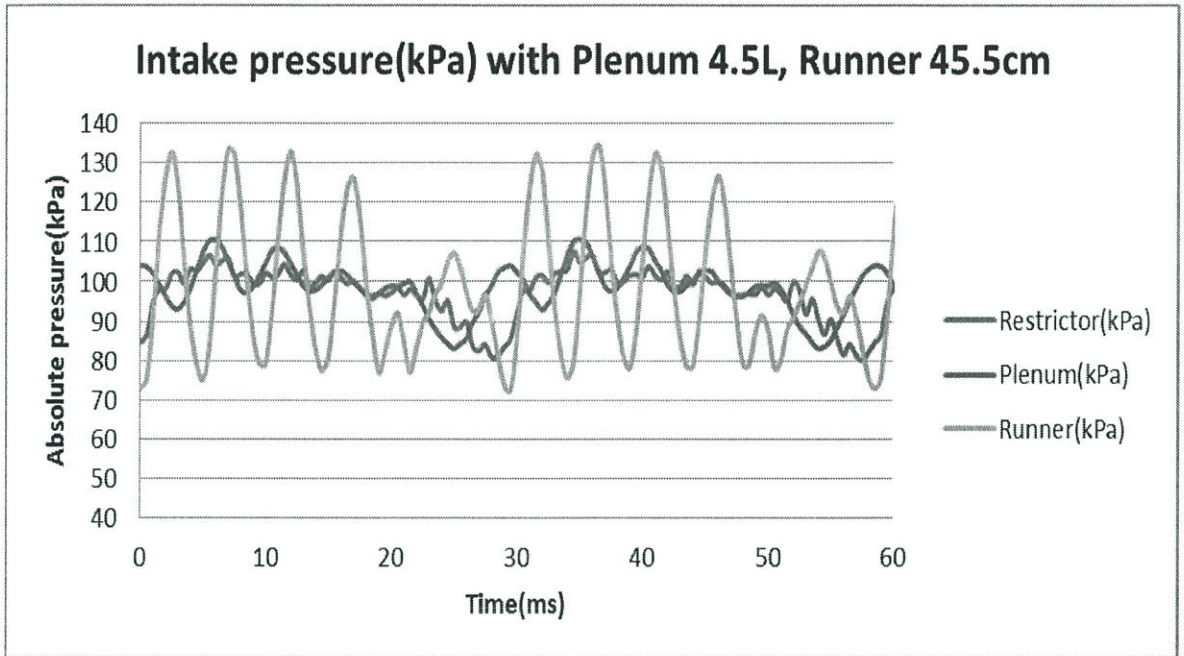
กรณีที่ 15 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



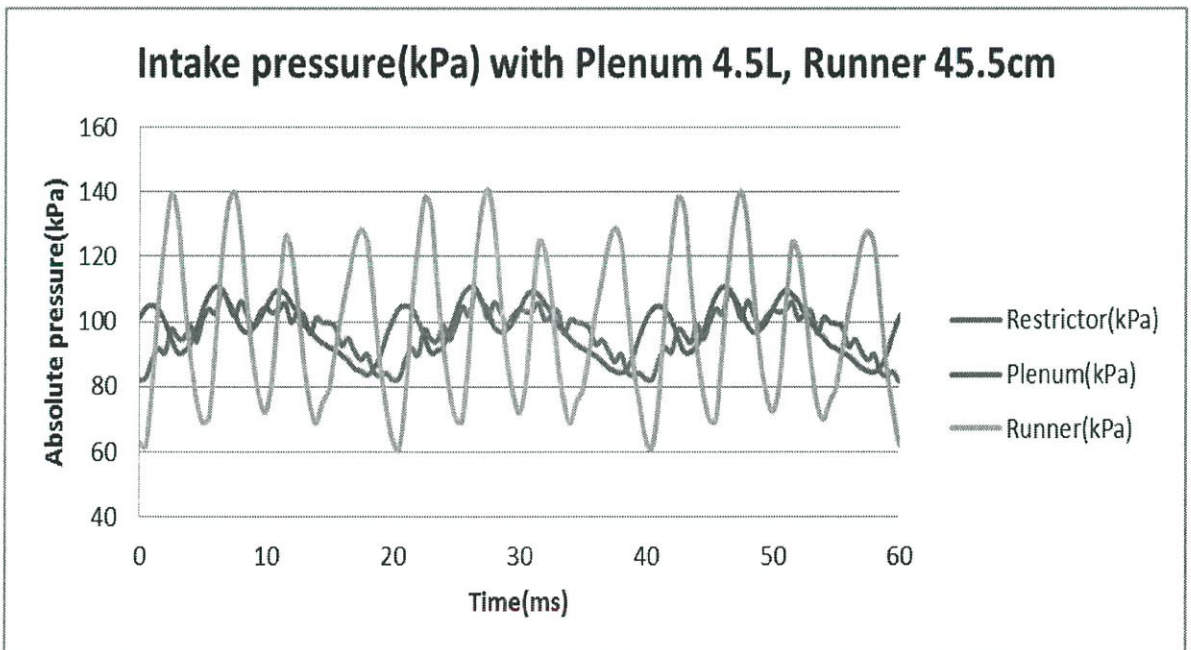
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



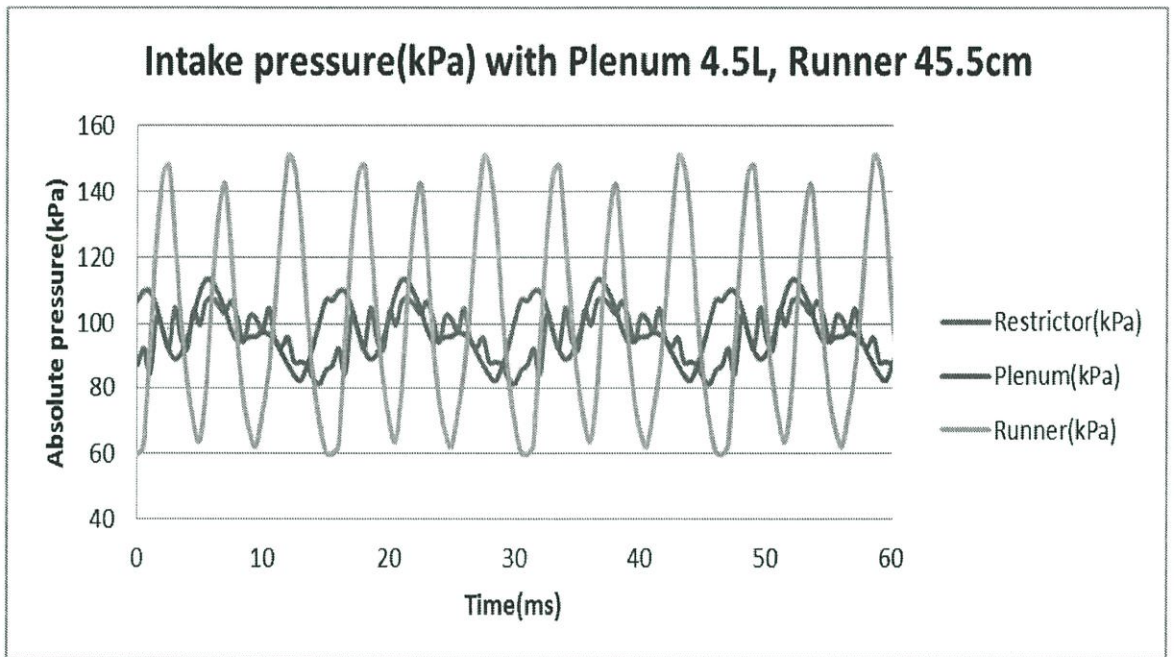
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

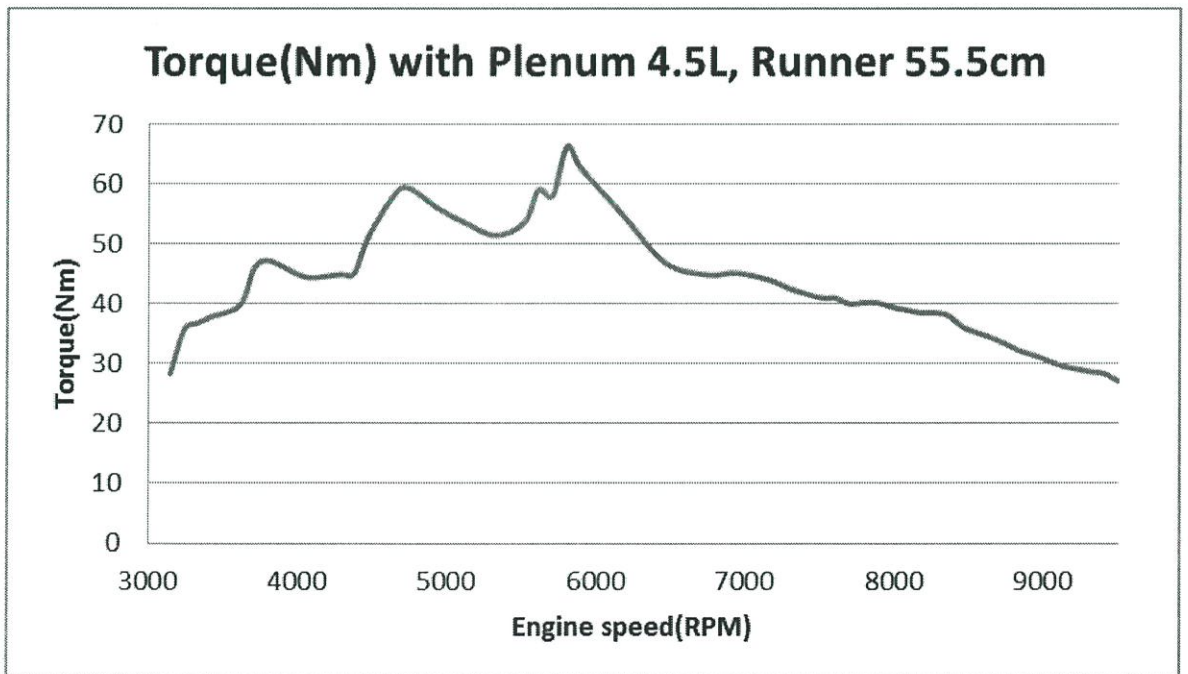


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

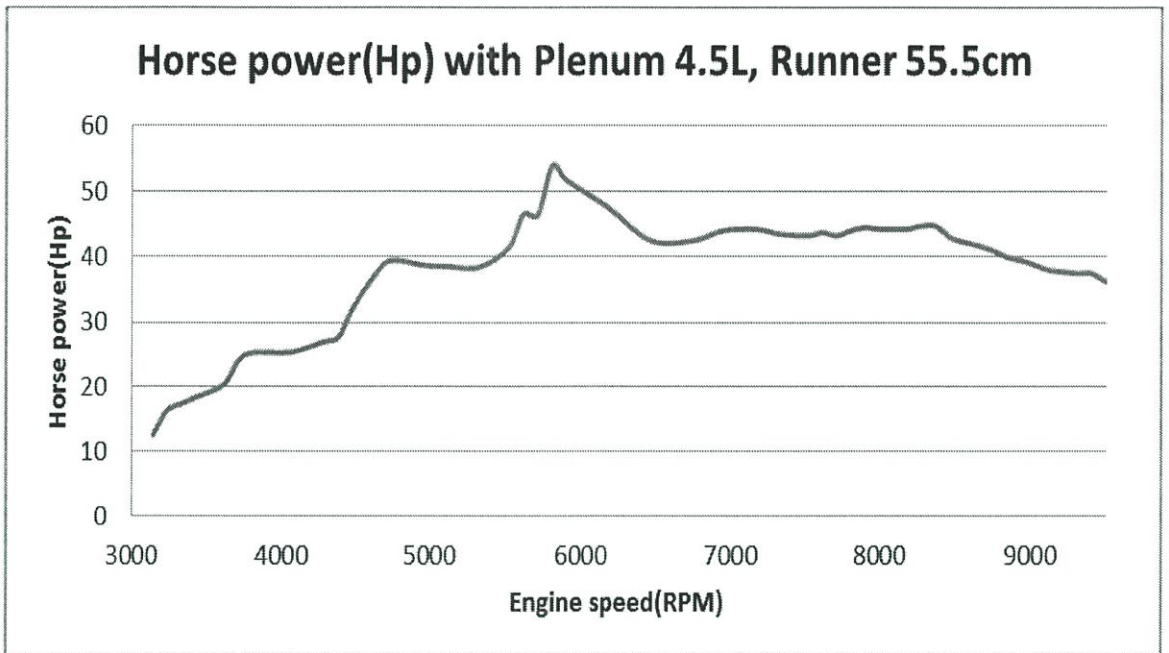


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอขวด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

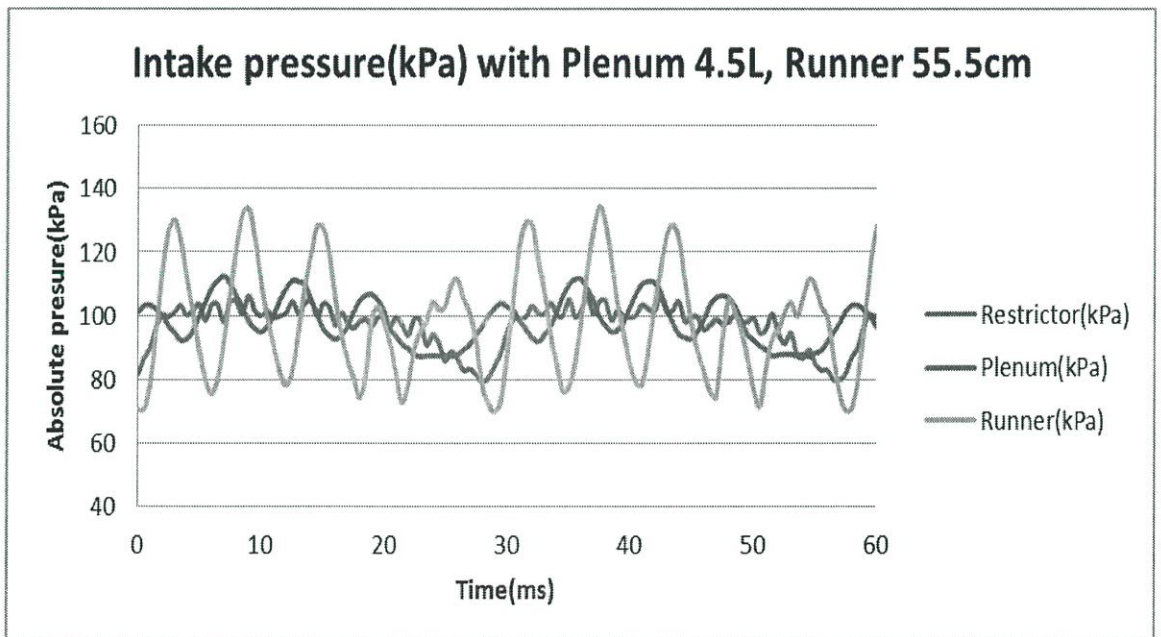
กรณีที่ 16 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



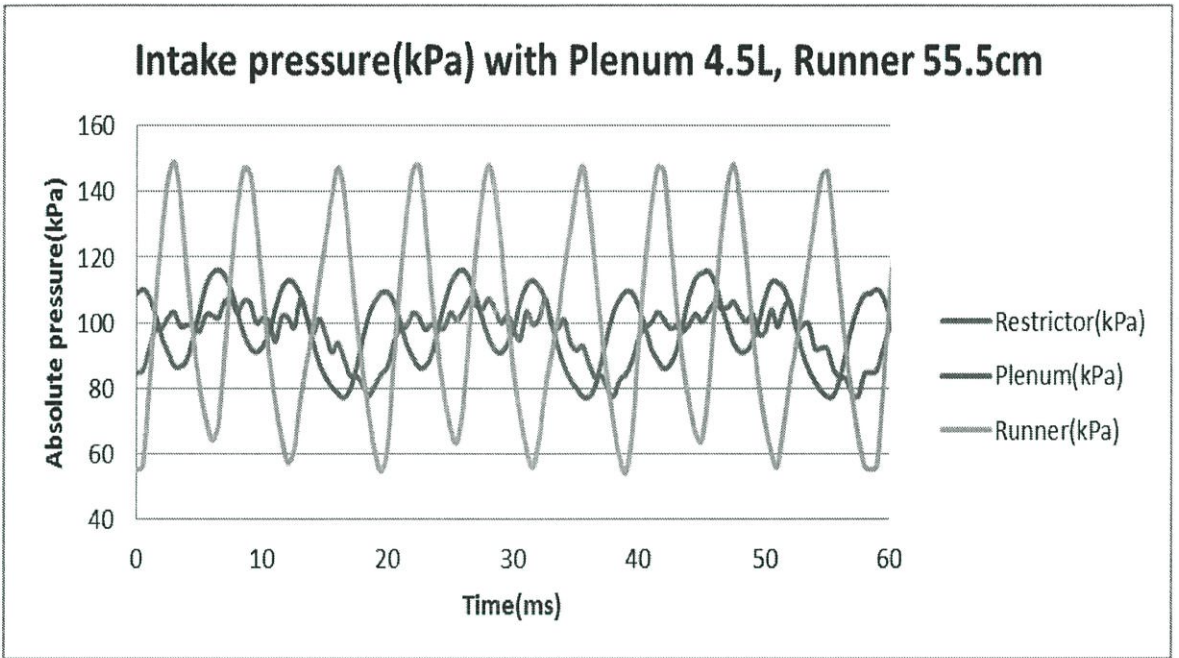
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



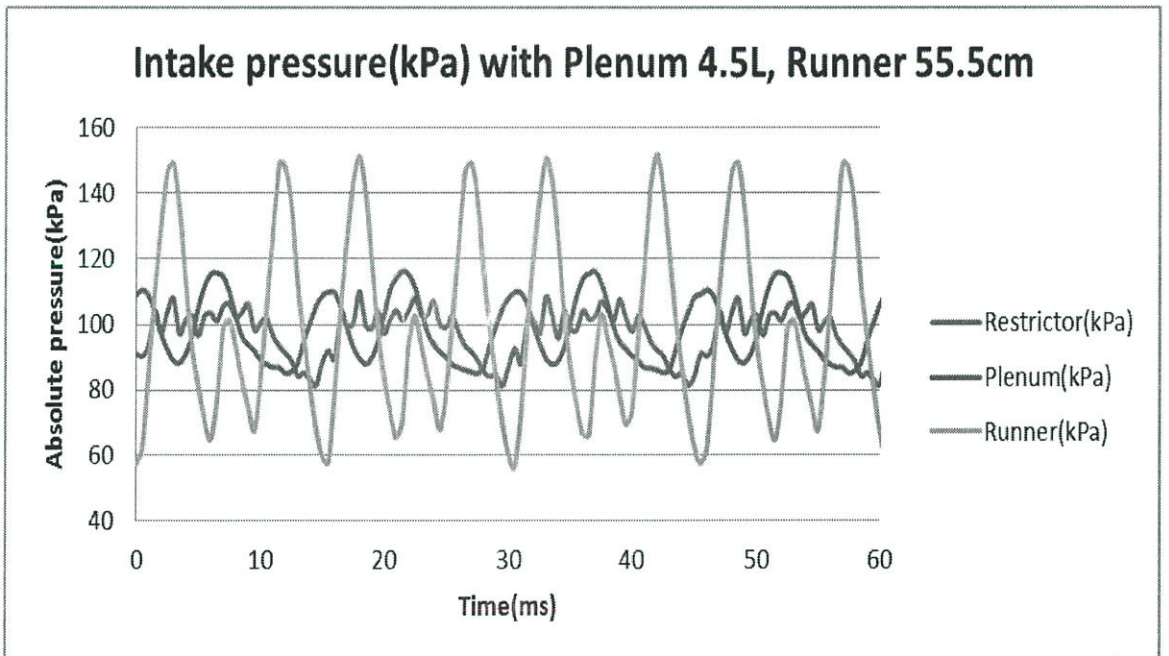
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 4.5 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

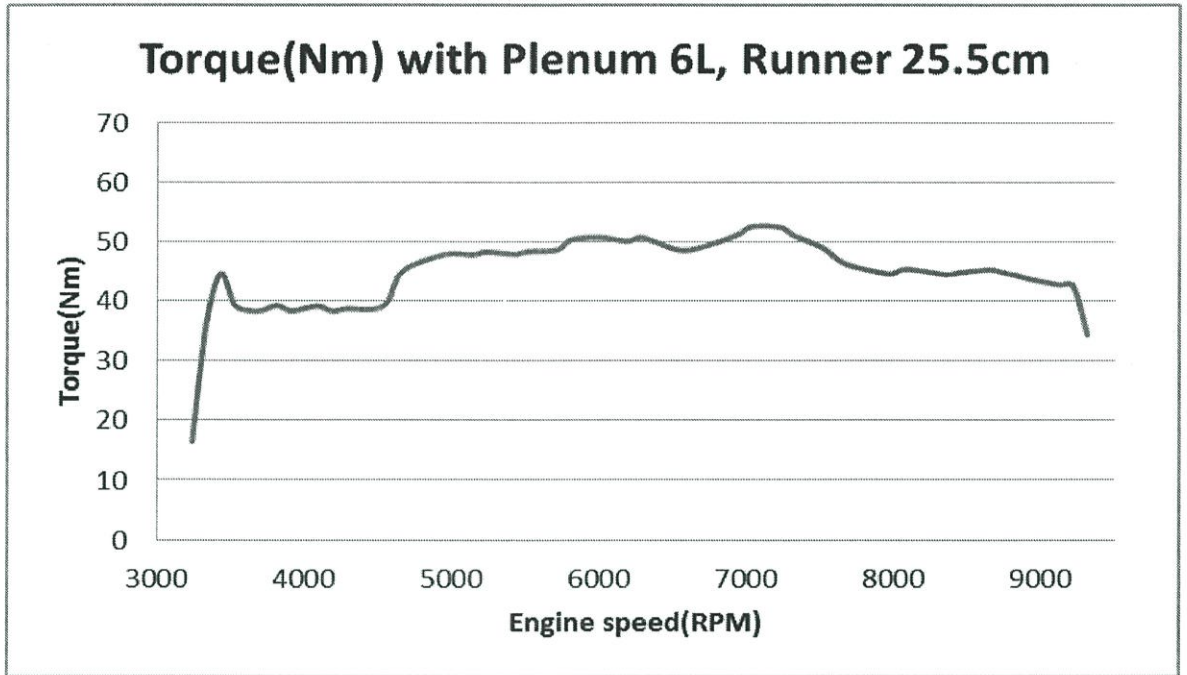


ความดันภายในท่อไอดี ในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

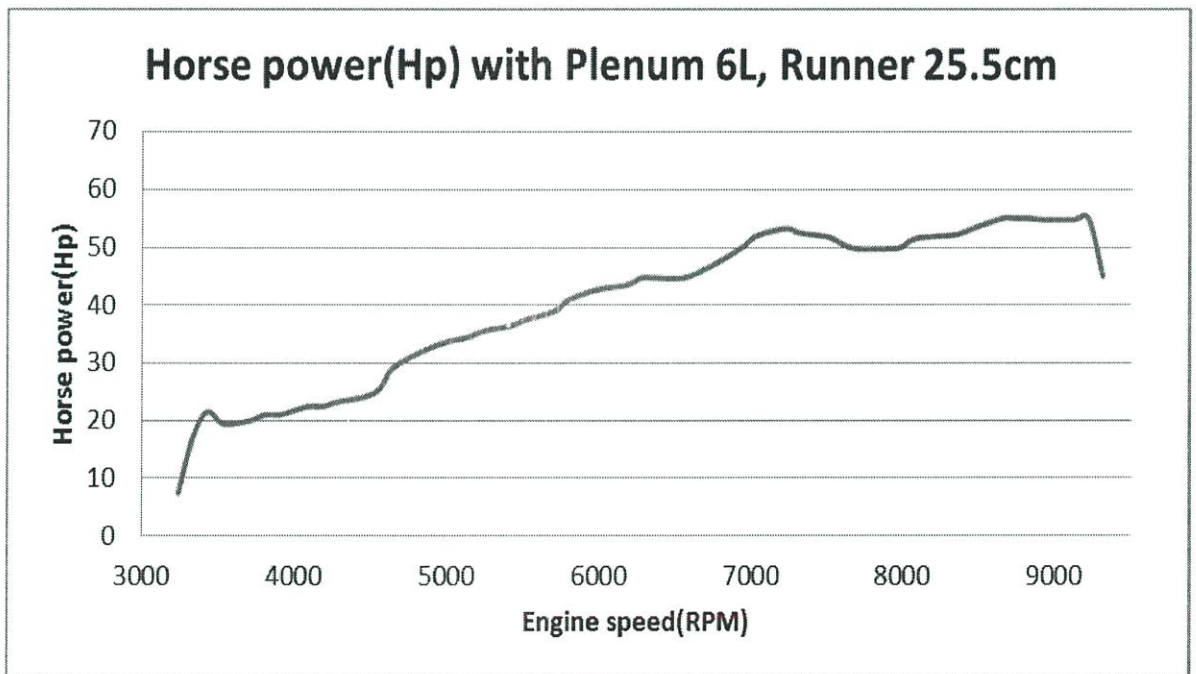


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

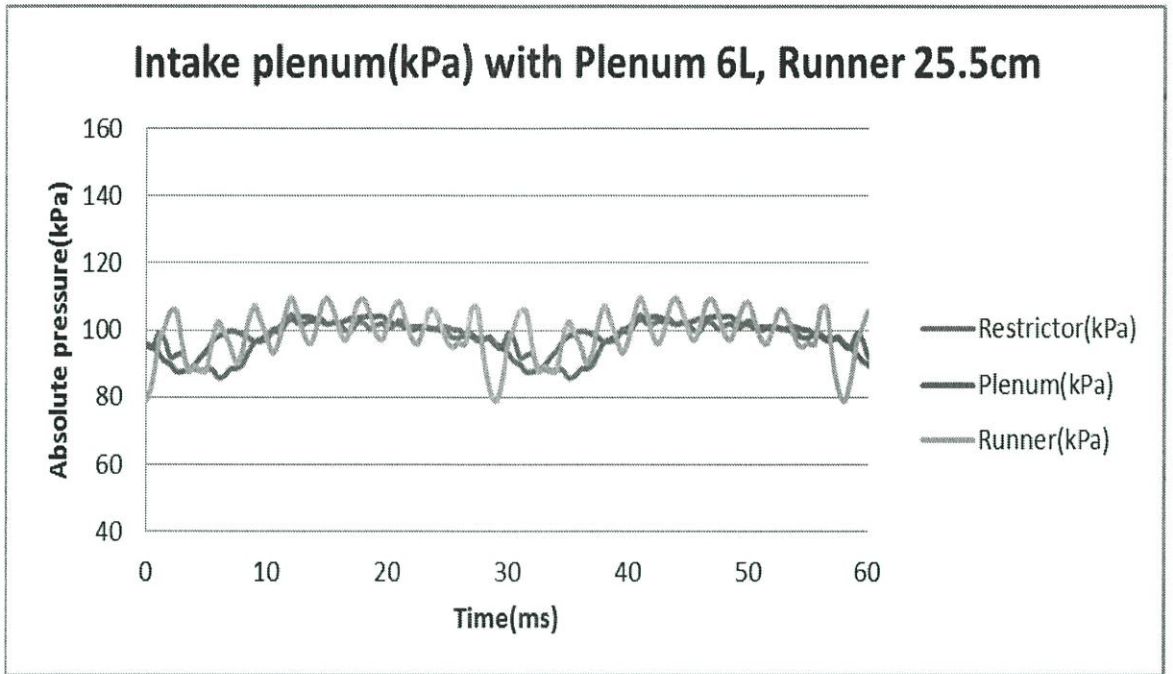
กรณี 17 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



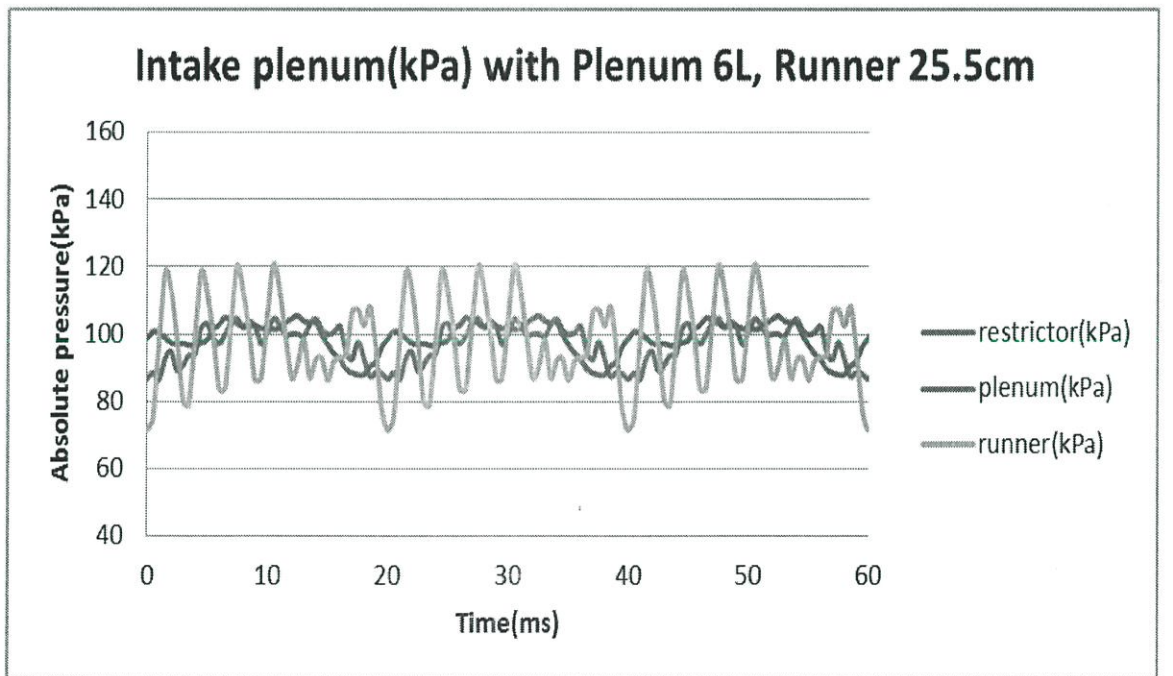
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



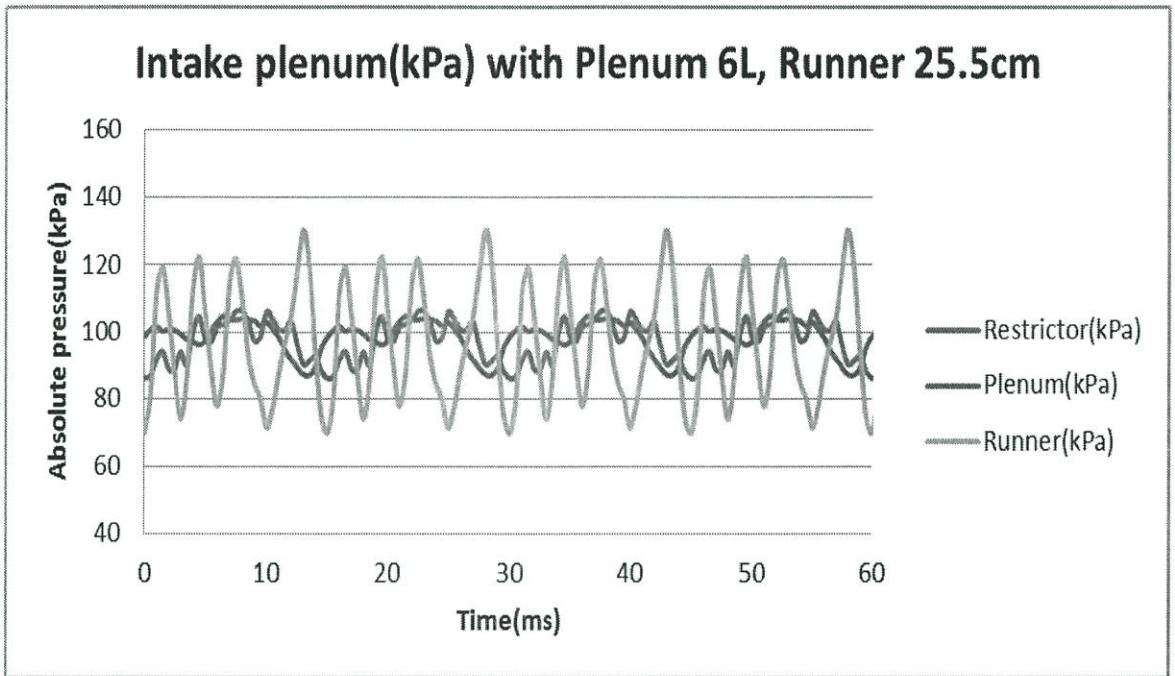
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 25.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

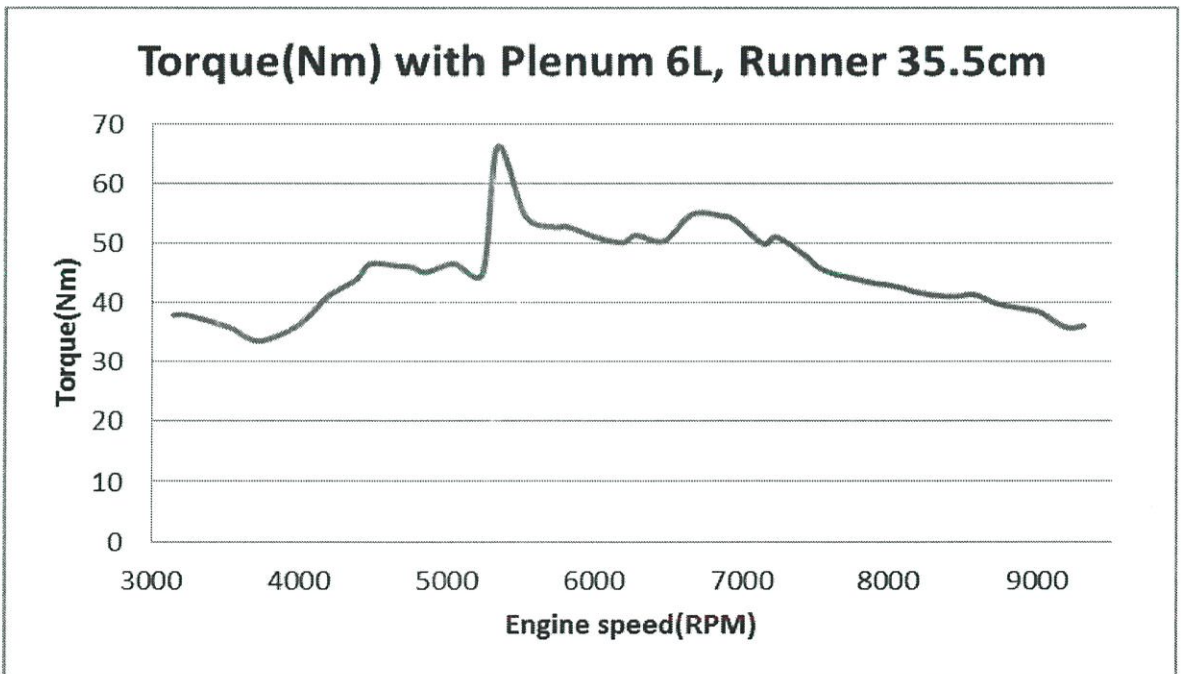


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

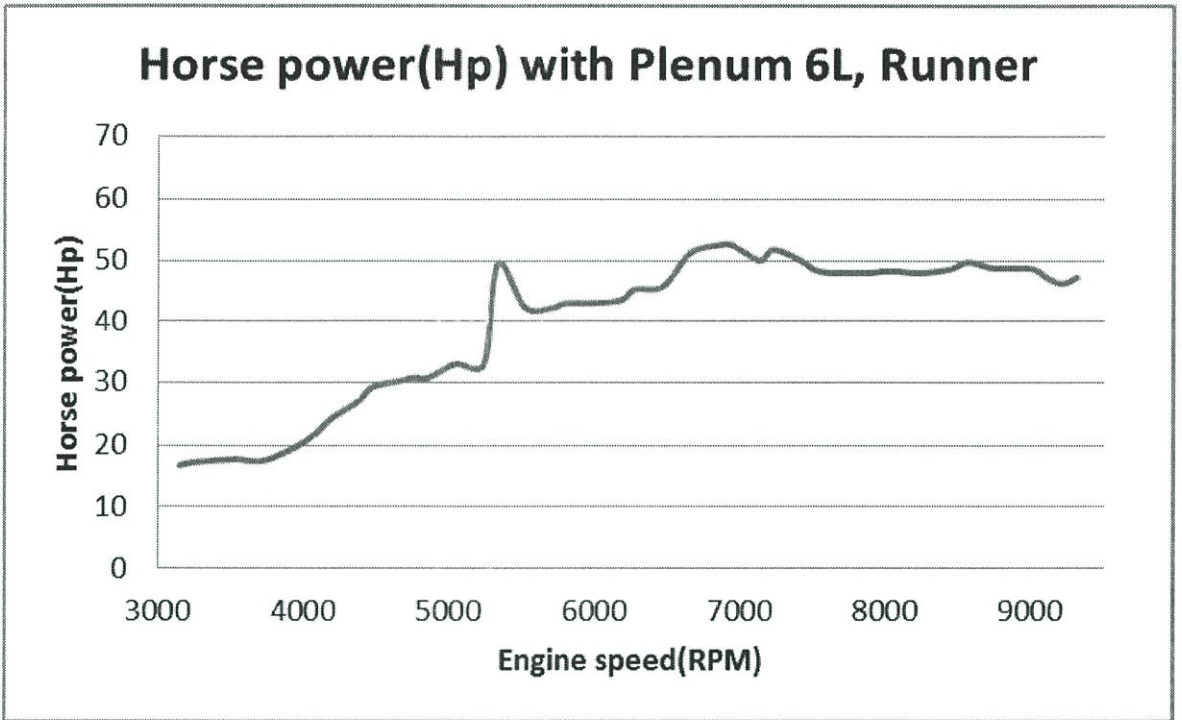


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

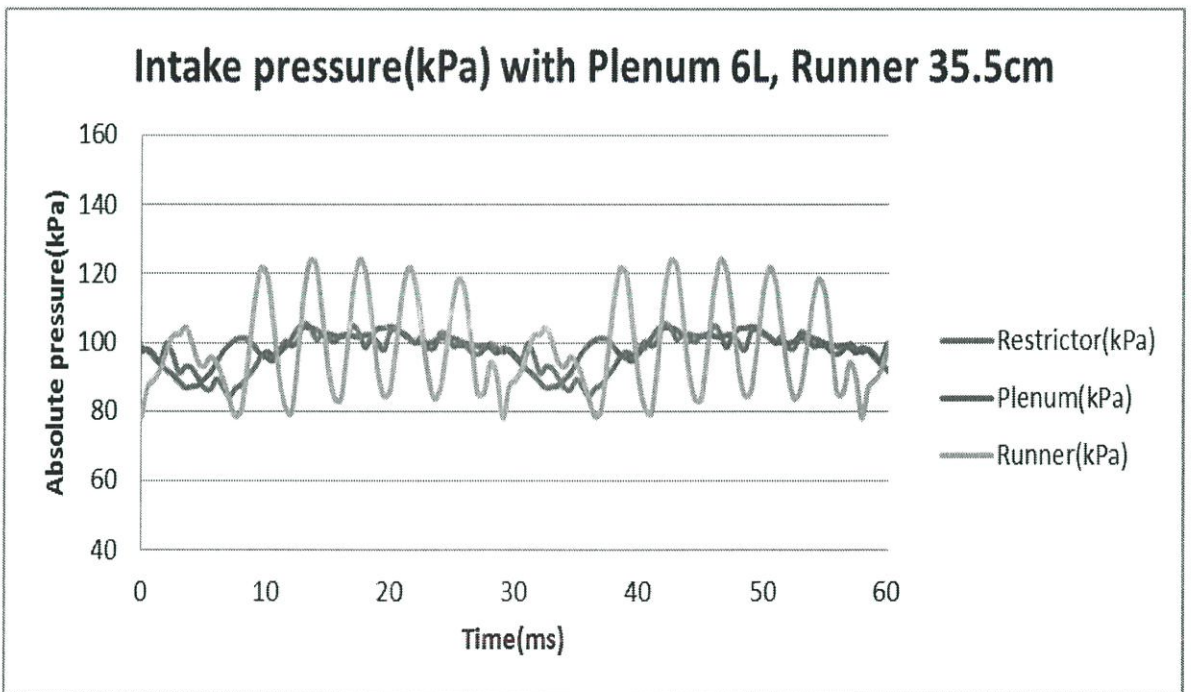
กรณีที่ 18 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



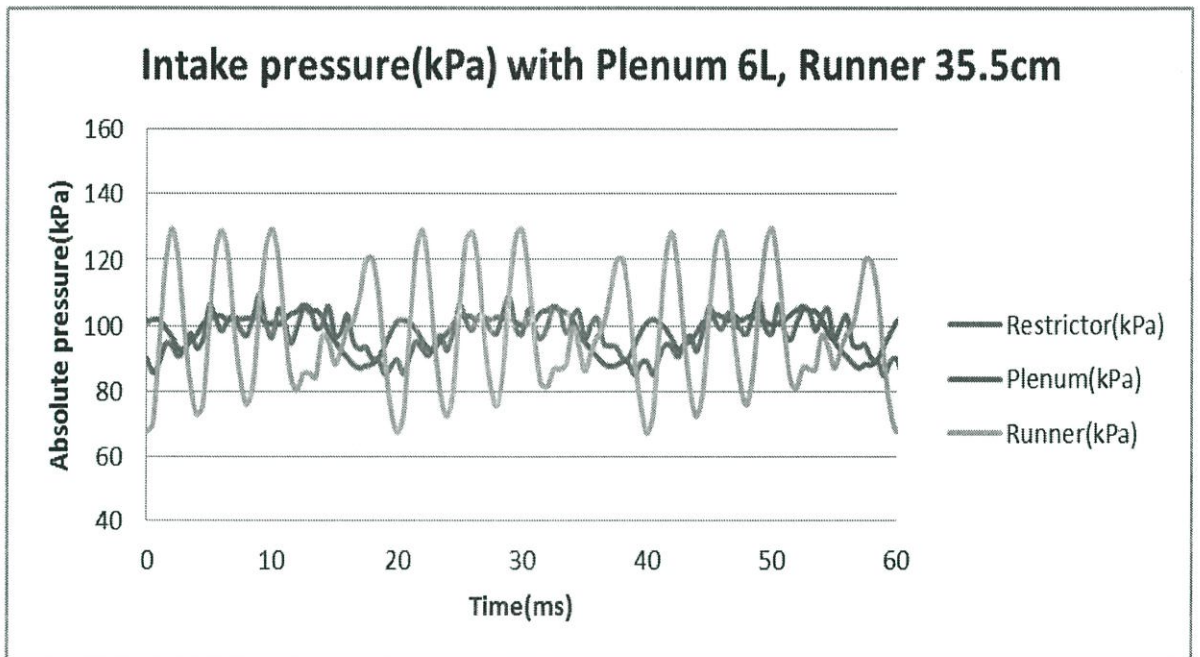
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



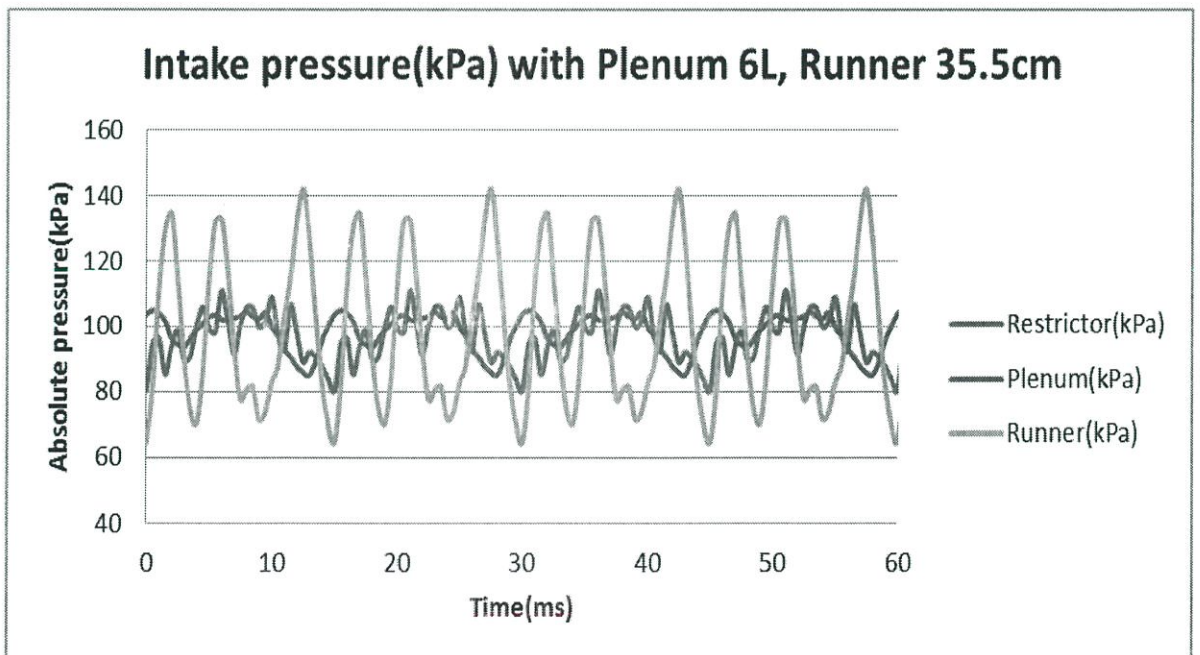
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 35.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

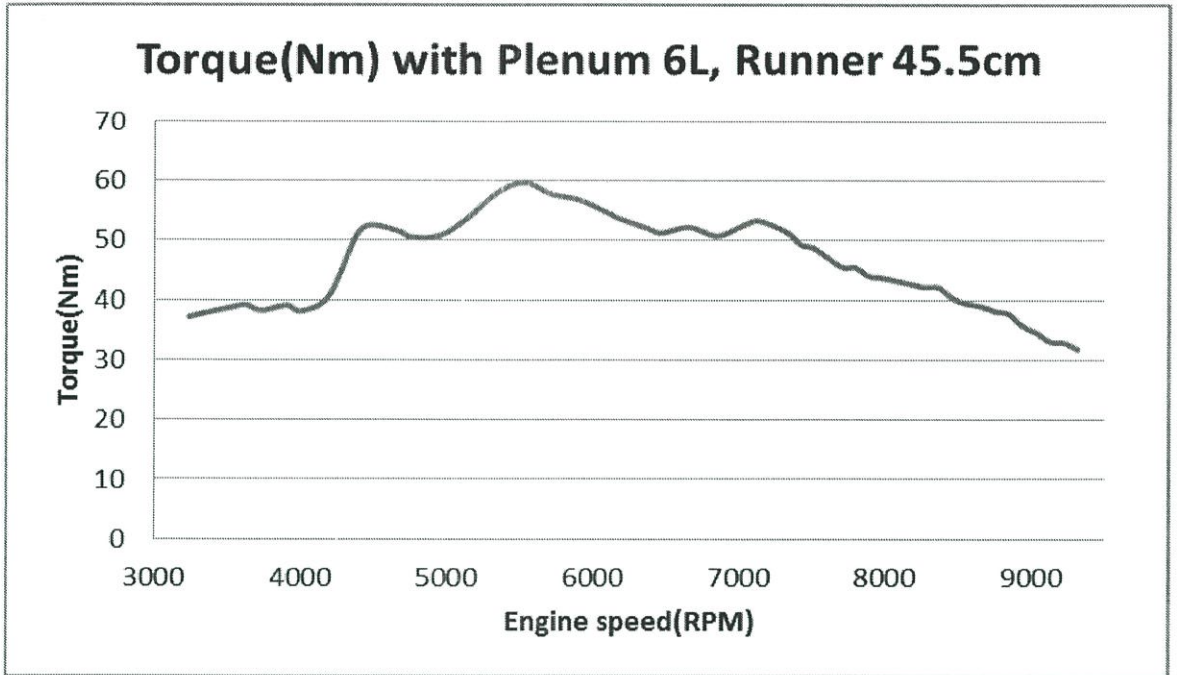


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

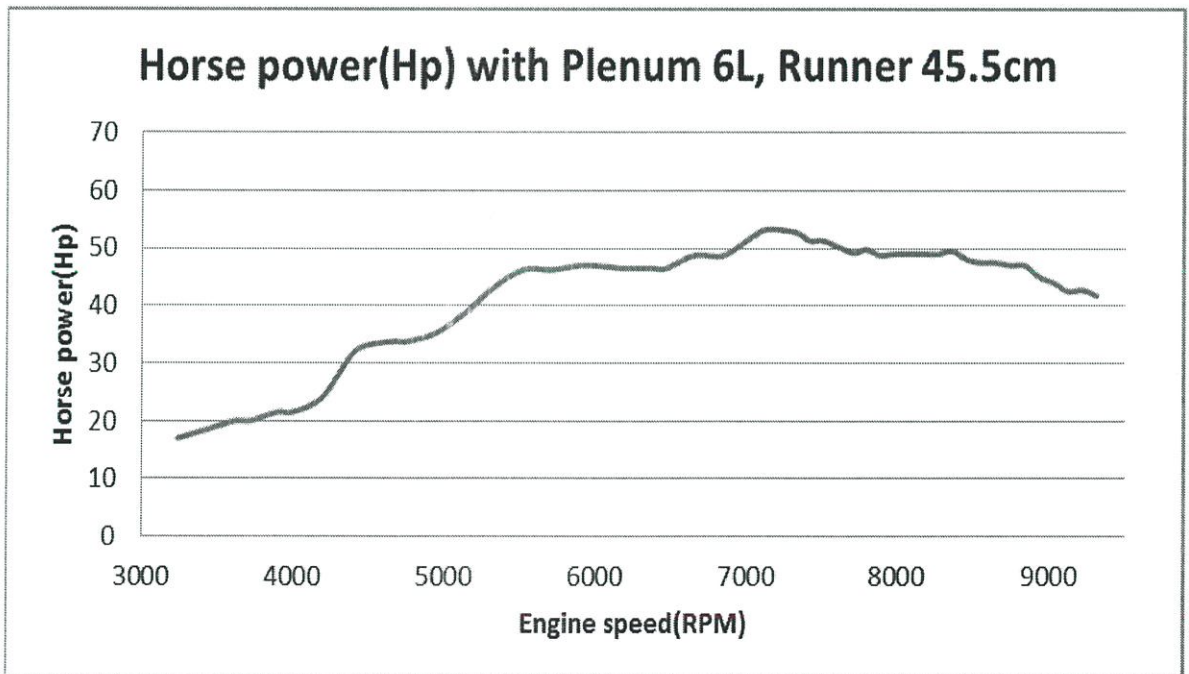


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

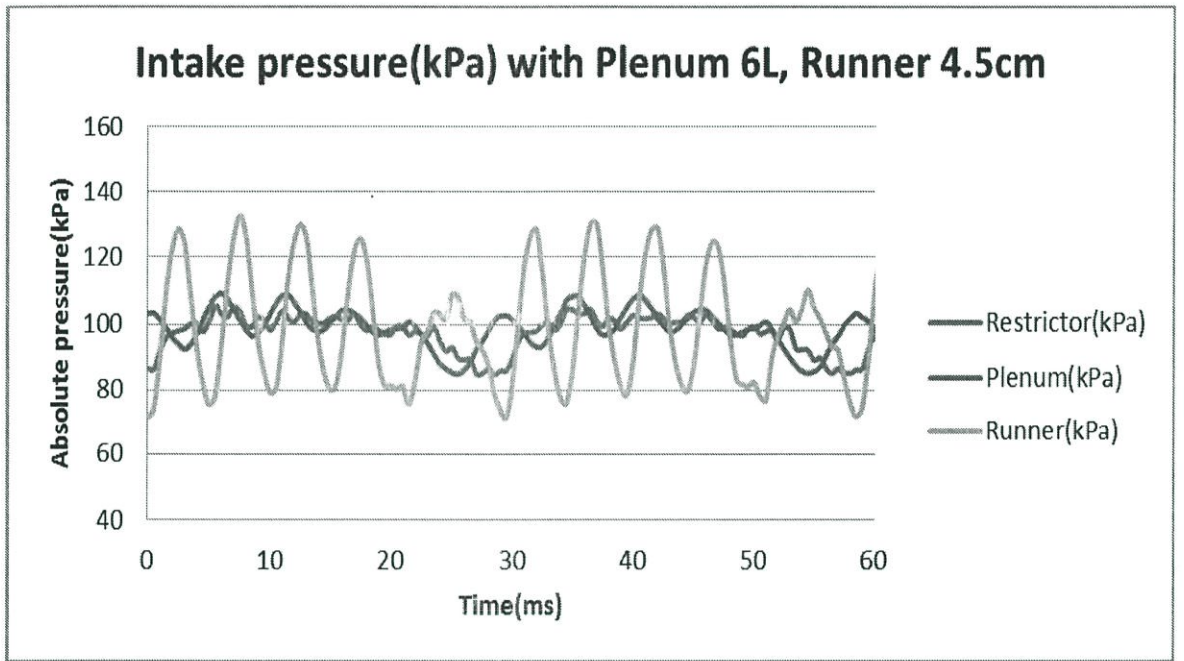
กรณีที่ 19 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



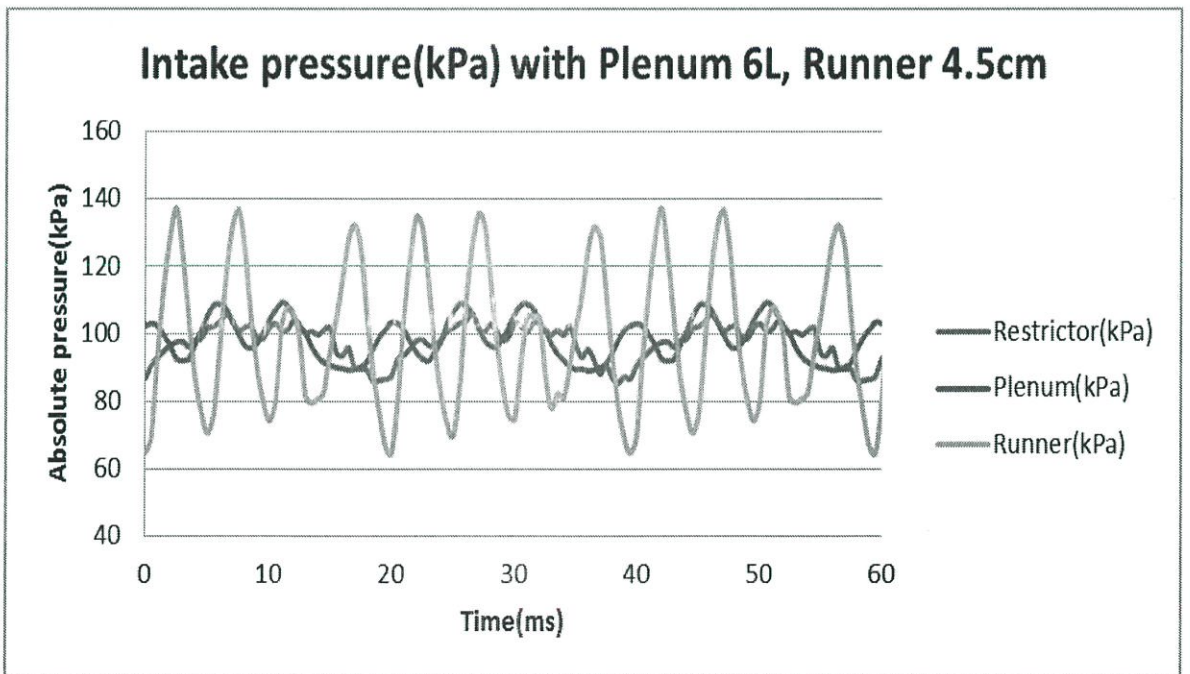
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



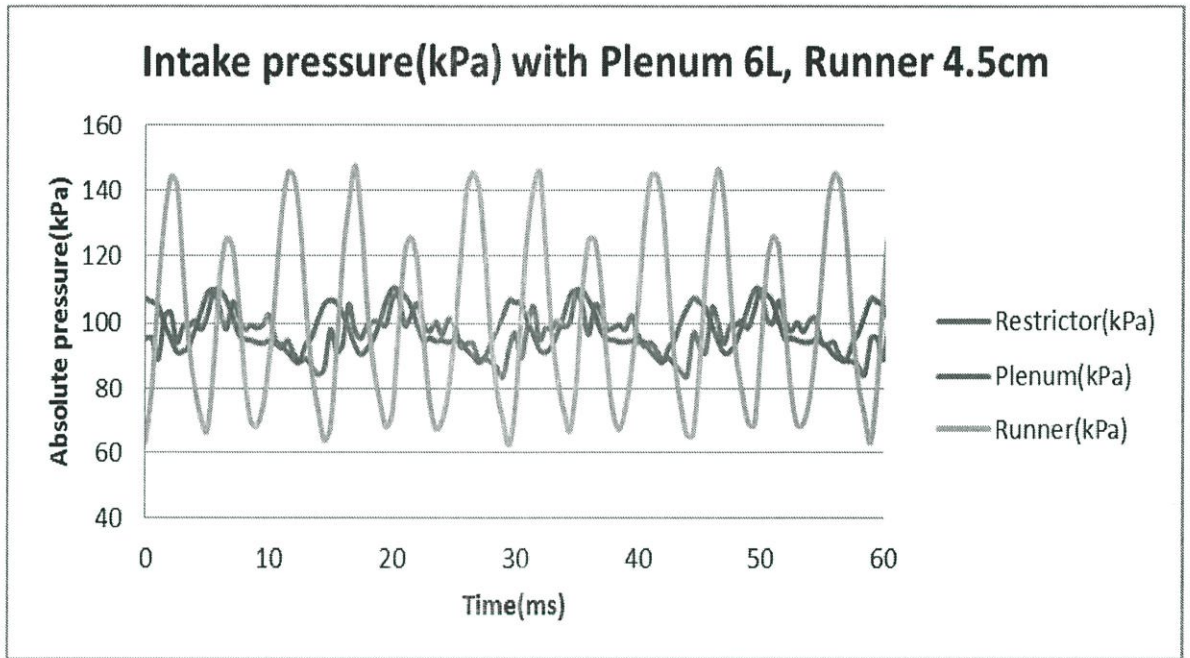
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 45.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดี ในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ

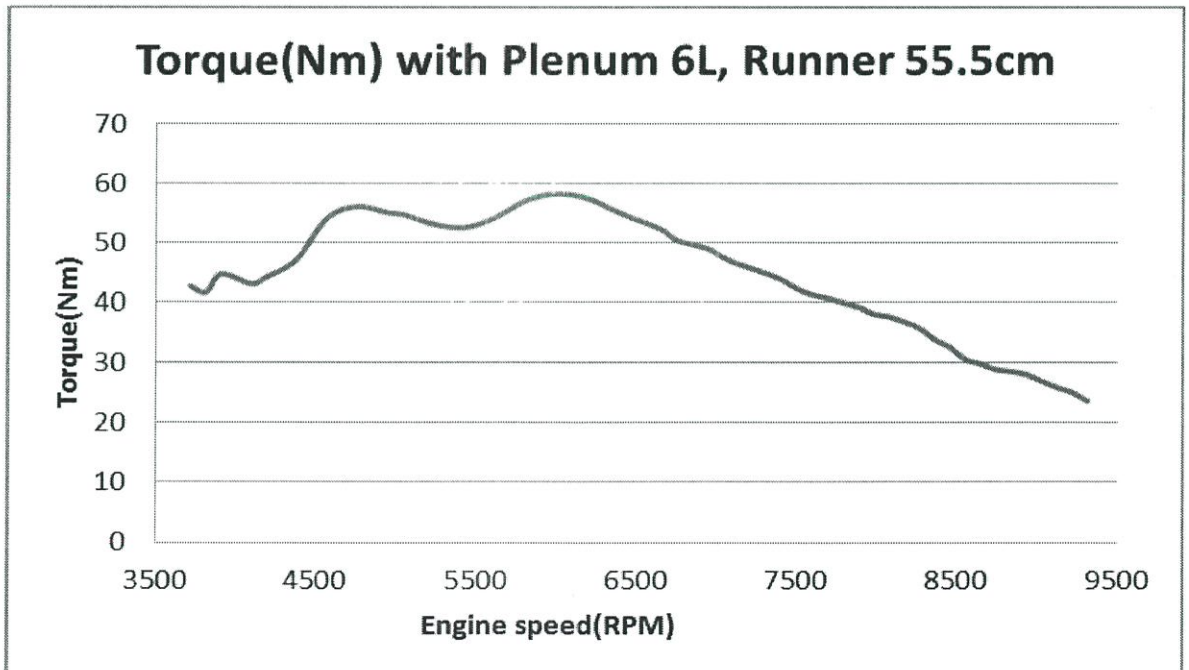


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ

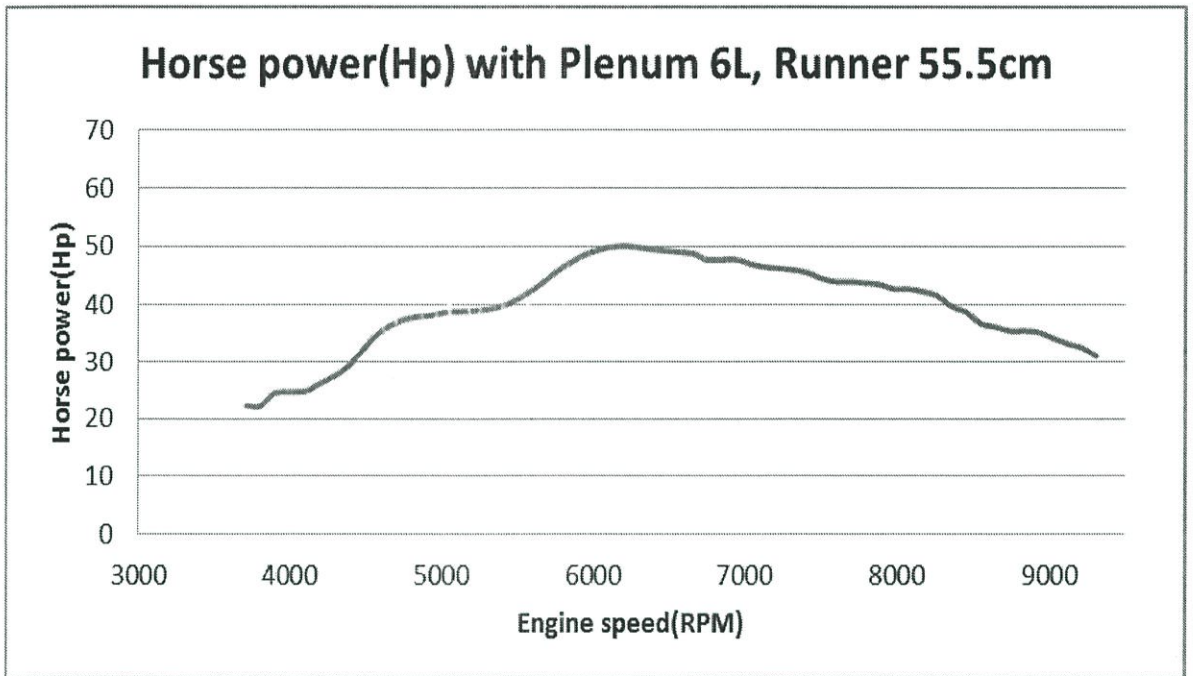


ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ

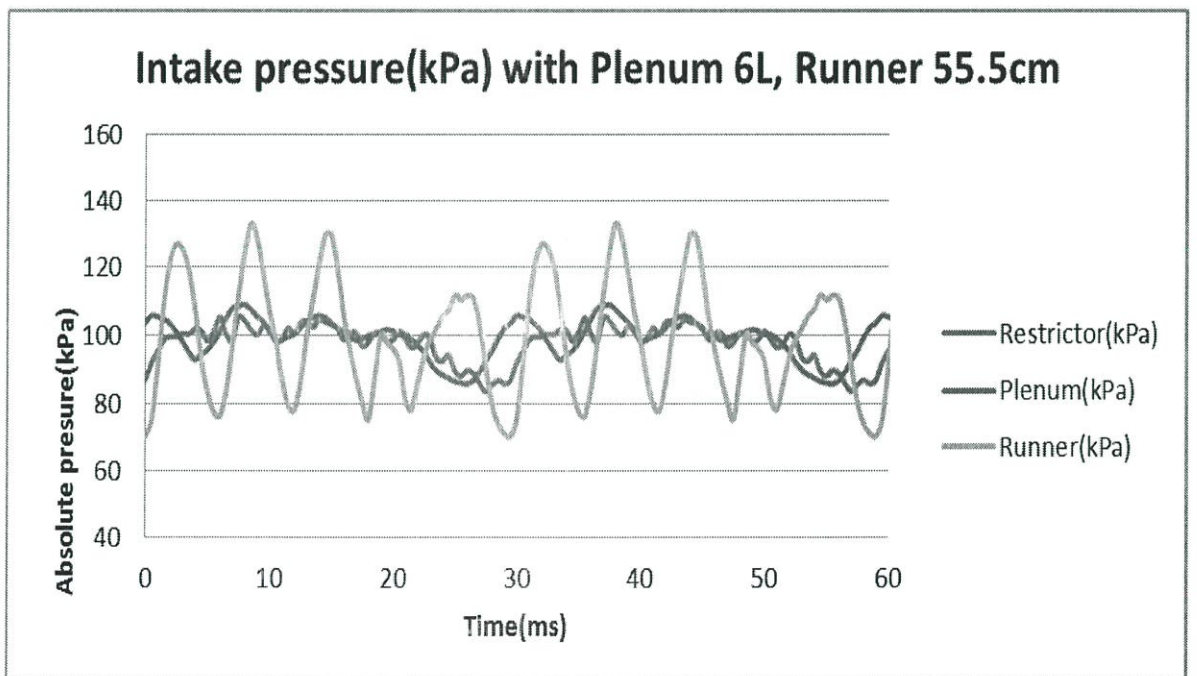
กรณีที่ 19 : ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



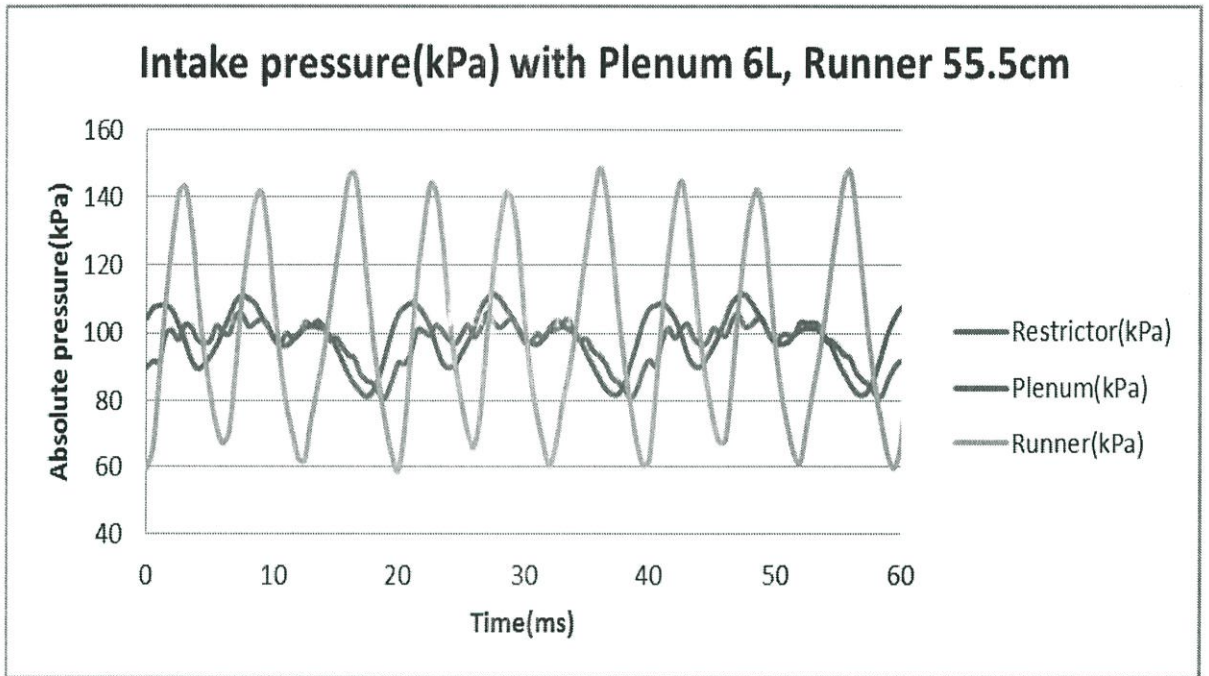
กราฟแสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



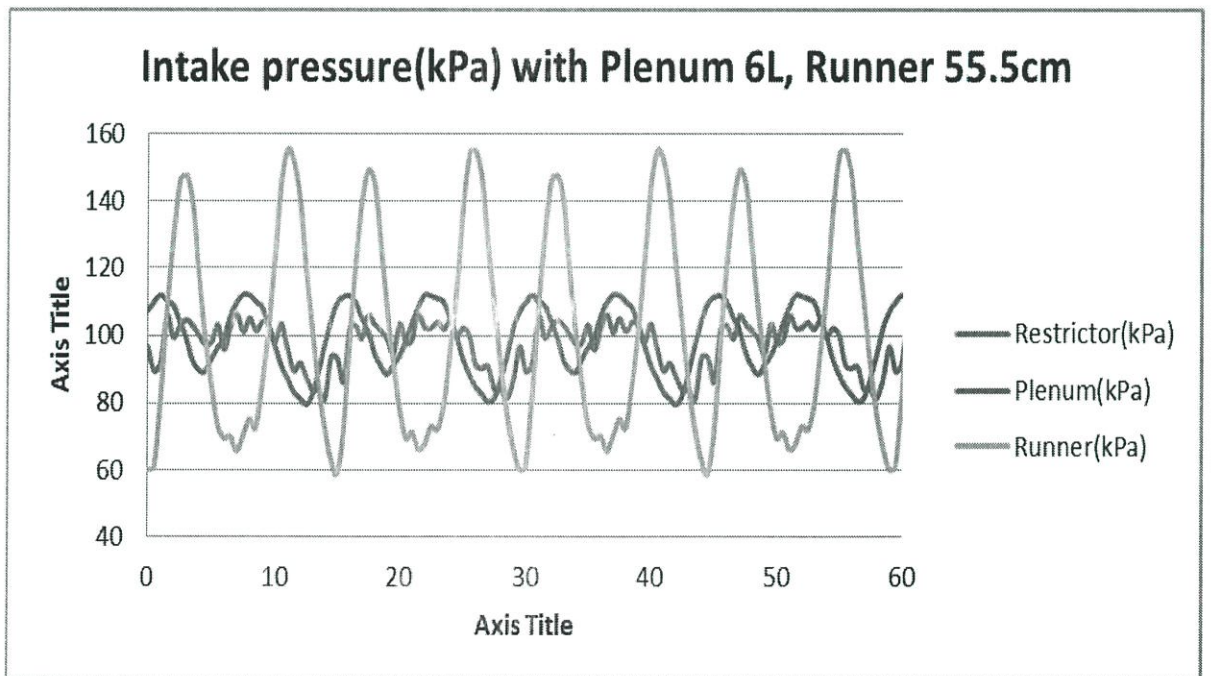
กราฟแสดงแรงม้าของเครื่องยนต์ ปริมาตรท่อพักอากาศ 6 ลิตร ความยาวท่อไอดี 55.5 เซนติเมตร



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 4000 รอบ



ความดันภายในท่อไอดีในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 6000 รอบ



ความดันภายในท่อไอดี ในตำแหน่งคอคอด ท่อพักอากาศ และท่อร่วมไอดี ที่ความเร็วเครื่องยนต์ 8000 รอบ