

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

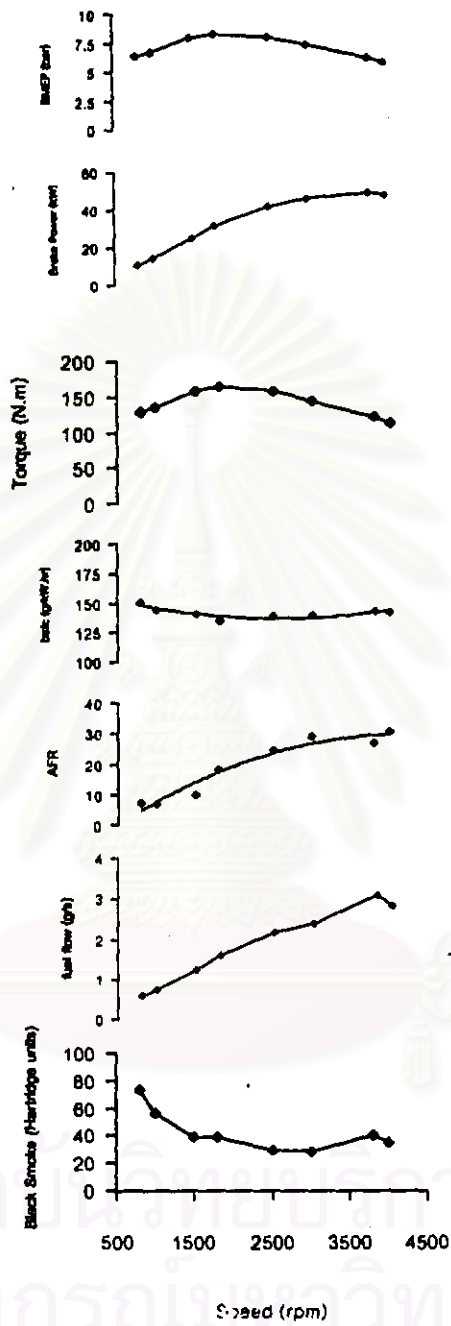
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบเครื่องยนต์เทอร์โบชาร์จเจอร์ดีเซลอีซูซุ รุ่น 4JA1L บนเอนจินไคนาโมมิเตอร์แบบสภาวะคงตัว ผลการทดสอบคอมเพรสเซอร์และเทอร์โบของเทอร์โบชาร์จเจอร์ยี่ห้อ IHI รุ่น RHF5 ตลอดจนการเปรียบเทียบผลการคำนวณสมรรถนะและไอเสียโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กับผลการทดสอบเครื่องยนต์

5.1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ที่สภาวะคงตัว

ข้อมูลผลการทดสอบและผลการคำนวณสมรรถนะเครื่องยนต์แสดงอยู่ในภาคผนวก(ก) กำลังของเครื่องยนต์ได้ถูกแก้ไขค่า (Corrected Power) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสภาวะอากาศเข้าเครื่องยนต์มาตรฐานที่ ความดันอากาศสัมบูรณ์ 100 kPa อุณหภูมิอากาศเข้า 25°C ความดันสัมบูรณ์อากาศแห้ง 99 kPa ตามมาตรฐานการทดสอบเครื่องยนต์ของ SAE J1349

รูปที่ 5.1และ5.2 แสดงผลของสมรรถนะของเครื่องยนต์เทอร์โบชาร์จเจอร์ดีเซลต่อความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ ที่ภาระเต็มที และภาระ 50 % ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะต่อความเร็วรอบ ที่ภาระ 100%

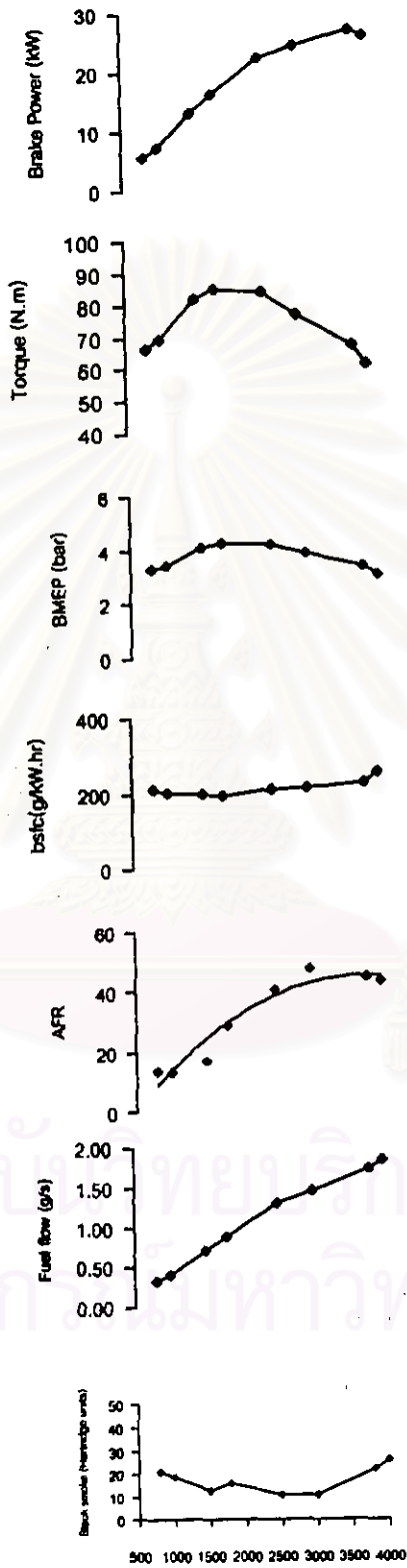
ภาระ 100 %

จากกราฟที่ 5.1 ความดันประสิทธิผลเฉลี่ยการทดสอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น โดยเริ่มจากรอบเดินเบา ไปจนถึงสูงสุด 8.8 บาร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที และหลังจากนั้นแนว

โน้มของเส้นกราฟตกลงเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น เป็นผลให้กำลังที่ได้จากเครื่องยนต์นั้นเพิ่มขึ้นตั้งแต่รอบเดินเบาและมีแนวโน้มของเส้นกราฟเพิ่มขึ้นไปเรื่อย เนื่องจากกำลังของเครื่องยนต์นั้นเป็นฟังก์ชันของแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ดังนั้นกำลังของเครื่องยนต์ที่สูงสุดไม่ได้อยู่ที่ แรงบิดสูงสุด แต่จะอยู่ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ คือ 3800 รอบต่อนาที เนื่องจากที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีแรงบิดสูงสุด แต่หลังจากนั้นจะลดลง แต่กำลังของเครื่องยนต์ยังเพิ่มขึ้นอีก เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบเครื่องยนต์มีผลมากกว่าการลดลงของแรงบิด ในส่วนของการประหยัดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์นั้นจากการทดสอบพบว่าที่ ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีจะทำให้ได้ อัตราส่วนของการบริโภคเชื้อเพลิงต่อกำลังของเครื่องยนต์ต่ำที่สุด

สำหรับค่าของปริมาณควันดำที่เกิดขึ้น พบว่าที่สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ภาวะต่างๆนั้น ปริมาณควันดำที่เกิดขึ้นจะน้อยมาก และจะเกิดมากขึ้นเมื่อภาระเพิ่มขึ้น โดยจากการทดสอบเครื่องยนต์พบว่าปริมาณควันดำเกิดมากที่สุดที่ภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ ที่ทุกๆความเร็วรอบ โดยที่ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 800 รอบต่อนาทีนั้นจะเกิดควันดำมากที่สุด โดยวัดค่าได้ 68 Hartidge units เนื่องจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม่เพียงพอ แต่ปริมาณควันดำจะลดลงเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณอากาศที่เข้าไปกระบอกสูบเพิ่มมากขึ้น ทำให้เพียงพอต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

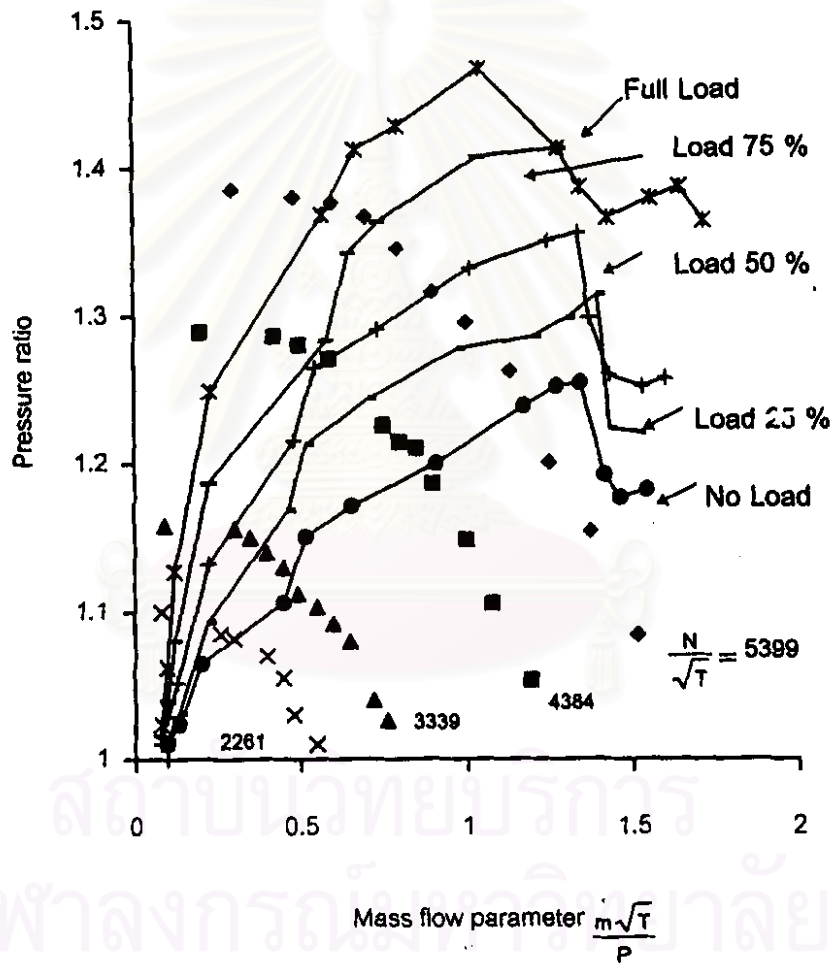
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะต่อความเร็วรอบ ที่ภาระ 50%

5.2 ผลการทดสอบเทอร์โบชาร์จเจอร์

ในการทดสอบเทอร์โบชาร์จเจอร์จะเป็นการทดสอบเพื่อนำผลไปใช้ประกอบข้อมูล ป้อนเข้าสำหรับโปรแกรมแบบจำลอง Filling and Emptying โดยข้อมูลการทดสอบเทอร์โบชาร์จเจอร์ แสดงไว้ที่ภาคผนวก (ข) ส่วนแผนภูมิคอมเพรสเซอร์ และแผนภูมิเทอร์โบไบน์ แสดงดังรูป 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 แสดงแผนภูมิคอมเพรสเซอร์ของเทอร์โบชาร์จเจอร์ โดยเทียบกับช่วงการทำงานของเครื่องยนต์

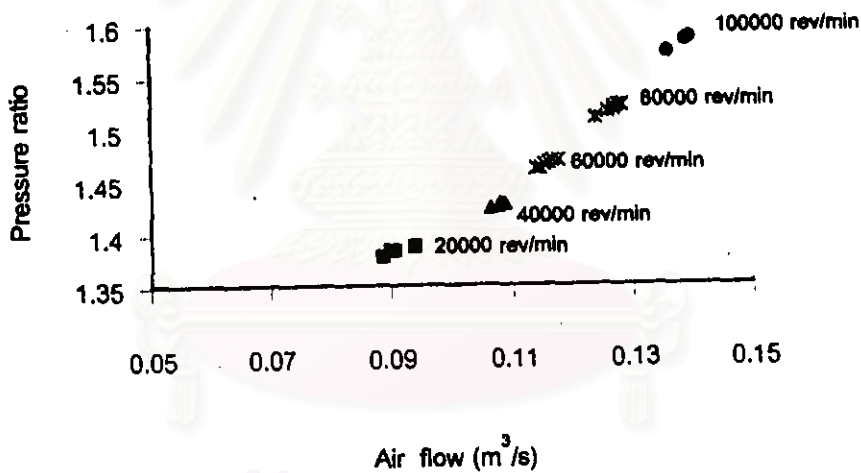
จากกราฟการทดสอบคอมเพรสเซอร์ จะทำการพล็อตในกราฟในความสัมพันธ์ของตัวแปรไว้มิติโดยมีความสัมพันธ์คือ

$$\frac{\dot{m}\sqrt{T}}{P} = f\left(\frac{N}{\sqrt{T}}, \frac{P_2}{P_1}\right)$$

ดังนั้นจึงทำการพล็อตค่าการเปลี่ยนแปลงเป็น Mass flow parameter $\left(\frac{\dot{m}\sqrt{T}}{P}\right), \frac{P_2}{P_1}$

และ $\frac{N}{\sqrt{T}}$ จากกราฟพบว่าที่ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์คงที่ใดๆนั้น เมื่อ Mass flow parameter เพิ่มขึ้นจะทำให้แนวโน้มของเส้นกราฟตกลง คืออัตราส่วนของความดันลดลงนั่นเอง

ในเส้นกราฟของ Mass flow parameter กับ อัตราส่วนความดันที่พล็อตลงบนกราฟของคอมเพรสเซอร์นั้นพบว่าเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นความดันในแมนิโฟลด์จะเพิ่มขึ้นไปด้วย จนกระทั่งถึงจุดที่ประตูระบาย (waste gate) ของเทอร์โบชาร์จเจอร์ทำงานความดันในแมนิโฟลด์จึงตกลง



รูปที่ 5.4 แสดงแผนภูมิเทอร์โบไนท์ของเทอร์โบชาร์จเจอร์

5.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองกับผลการทดสอบของเครื่องยนต์เทอร์โบชาร์จดีเซล

ภาวะ 100 % (Full load)

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า BMEP จากการคำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองกับค่าจากการทดสอบ ที่ความเร็วรอบต่างๆ

Speed (rpm)	BMEP (Calculated) (bar)	BMEP (Measured) (bar)
1500	7.855	7.78
1800	8.822	8.75
2500	7.945	8.26
3000	6.864	7.63
3800	7.519	6.91
4000	7.215	6.3

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า bsfc จากการคำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองกับค่าจากการทดสอบ ที่ความเร็วรอบต่างๆ

Speed (rpm)	bsfc (Calculated) (g/kW.hr)	bsfc (Measured) (g/kW.hr)
1500	219.05	212.02
1800	228.72	215.59
2500	231.36	237.57
3000	252.69	239.31
3800	282.56	267.94
4000	271.94	285.23

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า Power จากการคำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองกับค่าจากการทดสอบ ที่ความเร็วรอบต่างๆ

Speed (rpm)	Power (Calculated) (kW)	Power (Measured) (kW)
1500	24.54	24.30
1800	33.07	32.80
2500	41.36	43.00
3000	42.86	47.67
3800	59.50	54.68
4000	60.10	52.48

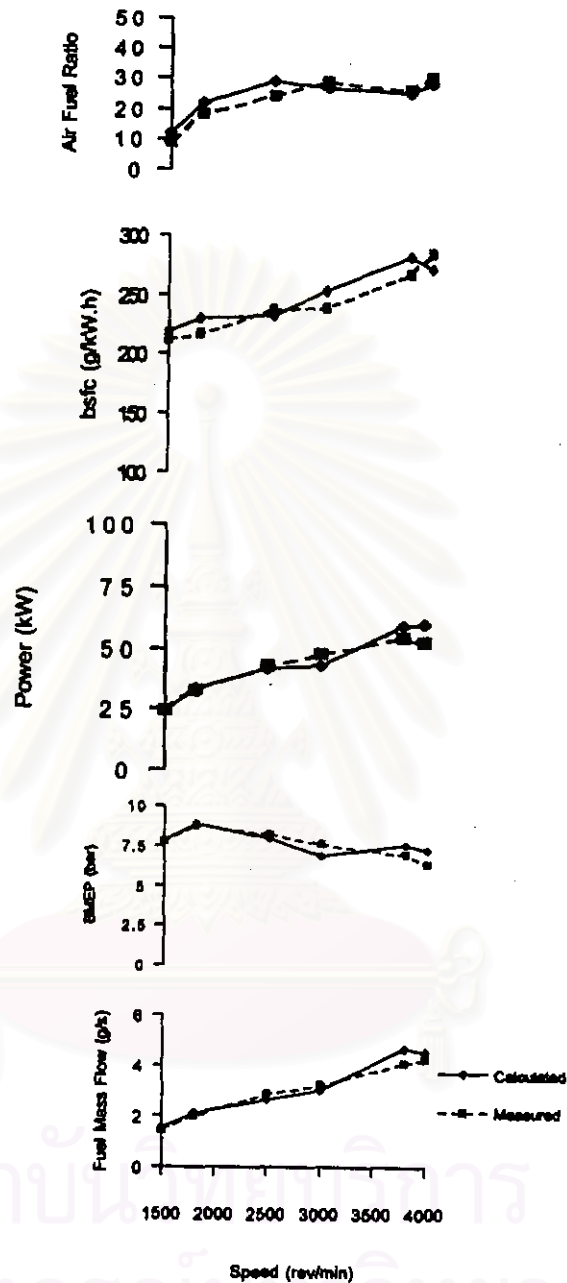
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า Fuel mass flow จากการคำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองกับค่าจากการทดสอบ ที่ความเร็วรอบต่างๆ

Speed (rpm)	Fuel mass flow (Calculated) (g/s)	Fuel mass flow (Measured) (g/s)
1500	1.49	1.45
1800	2.10	1.99
2500	2.66	2.88
3000	3.01	3.21
3800	4.67	4.12
4000	4.54	4.22

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า Air fuel Ratio จากการคำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองกับค่าจากการทดสอบ ที่ความเร็วรอบต่างๆ

Speed (rpm)	Air fuel ratio (Calculated)	Air fuel ratio (Measured)
1500	12	9
1800	21.63	18.26
2500	28.92	24.62
3000	27.34	29.01
3800	25.47	26.62
4000	28.56	30.49

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะและค่าไอเสียระหว่างการคำนวณกับการทดสอบที่สภาวะคงตัว ณ ความเร็วรอบต่างๆ (ภาระ 100%)

จากรูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะจากการคำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองกับการทดสอบ ที่ภาระการทำงานของเครื่องยนต์เต็ม ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่า ที่รอบสูงๆ นั้นค่าการกินน้ำมันเชื้อเพลิงที่คำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลองจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ค่าของกำลัง และค่าความดันประสิทธิผลเฉลี่ยของเครื่องยนต์ในช่วงความ

เร็วรอบของเครื่องยนต์นี้สูงตามไปด้วย ส่วนค่าAFR(อัตราส่วนการบริโภคอากาศต่อเชื้อเพลิง)ในช่วงของความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ต่างๆ นั้น การคำนวณจากแบบจำลองจะได้ค่าของ AFR สูงกว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบ แต่เมื่อที่รอบสูงๆ ค่า AFR จากการคำนวณจะมีค่าเข้าใกล้กับค่าที่ได้จากการทดสอบ

จากโปรแกรมแบบจำลอง Filling and Emptying ที่ผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าในสมการ และสมมติฐานต่างๆ ที่ผู้ประดิษฐ์โปรแกรมได้นำมาใช้ข้างนั้น มีความสอดคล้องกันอย่างดี โดยจะเห็นจากงานวิจัยที่ต่างๆ (ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2) โดยกล่าวได้ว่า ในแบบจำลอง Filling and Emptying นั้น จะพิจารณาส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยนต์เป็นปริมาตรควบคุม ซึ่งมวลของก๊าซสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเทียบกับเวลา และนำทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิก คือสมการการอนุรักษ์มวลและอนุรักษ์พลังงานเข้ามาคำนวณสภาวะที่เกิดขึ้นภายในปริมาตรควบคุมต่างๆ ถึงแม้ว่าข้อมูลของอัตรามวลที่ไหลเข้าและออกของแต่ละปริมาตรควบคุม กำหนดเป็นการไหลแบบหนึ่งมิติ และเป็นสภาวะกึ่งคงตัว ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วการไหลของไอดีและไอเสียผ่านปริมาตรควบคุมต่างๆนั้นจะไหลแบบ สามมิติและไม่คงตัว และมีการสูญเสียขึ้นจากการไหล แต่สมการที่นำมาใช้ในการคำนวณหาอัตรามวลไหลเป็นสมการในรูปที่ง่ายๆและขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิภายในปริมาตรควบคุมเท่านั้น ส่วนการสูญเสียต่างๆจะแทนในรูปของค่าคงที่ Cd ดังสมการที่ 2.9 ซึ่ง L.J. Kastner⁽²¹⁾ และ Trengrouse⁽²²⁾ ได้เสนอผลของการไหลและค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว คือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นจะได้มาจากสมมติฐานนี้ แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามากเมื่อพื้นที่การไหลเล็กมากๆ แต่สำหรับเครื่องยนต์การไหลในพื้นที่เล็กๆจะเกิดที่ขณะเดียวเท่านั้นคือขณะที่วาล์วยกตัวน้อยๆ ซึ่งถือเป็นส่วนอัตราการไหลที่น้อย เมื่อเทียบกับอัตราการไหลรวม

ส่วนในแบบจำลองของการเผาไหม้ผู้ประดิษฐ์โปรแกรมได้นำสมการของ Whitehouse-Way 's Method⁽¹²⁾ โดยให้การเผาไหม้อยู่ในรูปของห้องเผาไหม้เชิงเดี่ยว (Single Zone) ทำให้สมการการเผาไหม้อยู่ในรูปของสมการ

$$P_r = K \cdot M_{\#}^{1-y} \cdot M_{\#}^y \cdot P_{o_2}^m \cdot C_v d \theta$$

$$R = \frac{K'}{\theta N} \cdot \frac{P_{o_2}}{\sqrt{T}} \cdot (-act/T) \int (P - R) d\theta$$

ซึ่งสมการดังกล่าวจะมีค่าคงที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือ y , m , K , K' และ act โดยค่าเหล่านั้นได้มาจากการเผาไหม้และการกระจายตัวของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งสมการดังกล่าวไม่ได้มีผลของการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงเป็นสมการที่มีรูปแบบการใช้ที่ง่าย เมื่อเทียบกับสมการที่ใช้ในการคำนวณการเผาไหม้จากวิธีอื่นๆ

ในส่วนสมการของการถ่ายเทความร้อนนั้น ผู้ประดิษฐ์ได้นำสมการของ Annand ซึ่งเป็นสมการที่ไม่มีความซับซ้อน และสามารถนำมาใช้ในการคำนวณได้ง่าย โดยที่การถ่ายเทความร้อนภายในกระบอกสูบขึ้นอยู่กับ ความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ และขนาดของกระบอกสูบ และลักษณะของการไหลของก๊าซ

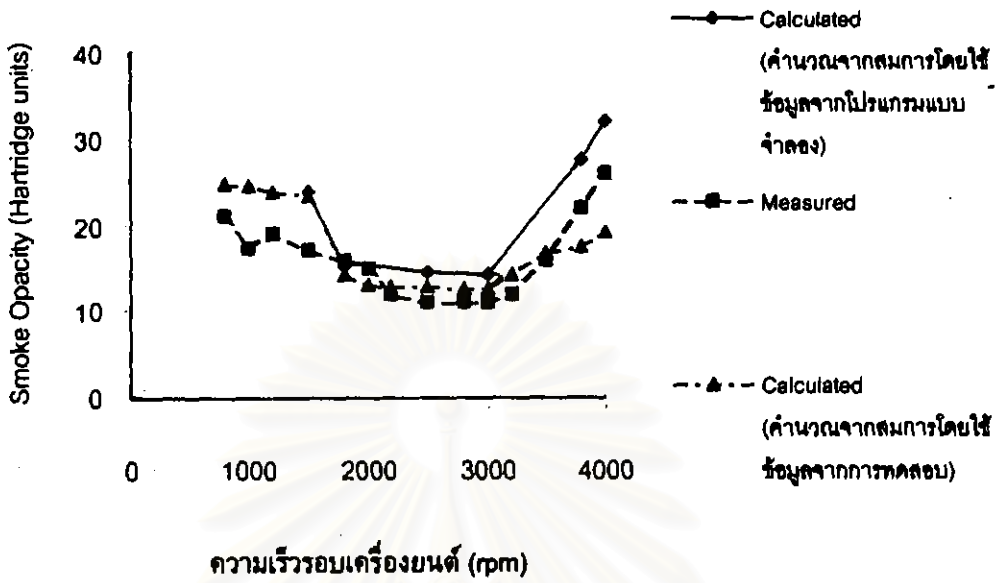
ในส่วนการแก้สมการอนุพันธ์ของโปรแกรมแบบจำลองนั้น จะใช้วิธีการแก้สมการโดยระเบียบวิธีของรุงเง - คุดตา อันดับที่ 4 (Fourth - Order Runge - Kutta Method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและมีความเที่ยงตรงสูง⁽²⁾

ดังนั้นจากผลของการเปรียบเทียบการคำนวณจากโปรแกรมแบบจำลองกับการทดสอบ จึงมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงและไปในทิศทางเดียวกัน แต่ก็ยังมีความแตกต่างกันอยู่ซึ่งอาจจะมาจากในแบบจำลองนั้นระบบการฉีดเชื้อเพลิงจะสมมติให้มีการฉีดเชื้อเพลิงในเชิงเส้น (linear) แต่ความเป็นจริงนั้นในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ไม่ได้เป็น เชิงเส้นตามแบบจำลอง ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าสมมติฐานของแบบจำลองนี้ยังไม่เข้าใกล้ความจริงในบางส่วน แต่ถือว่าเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

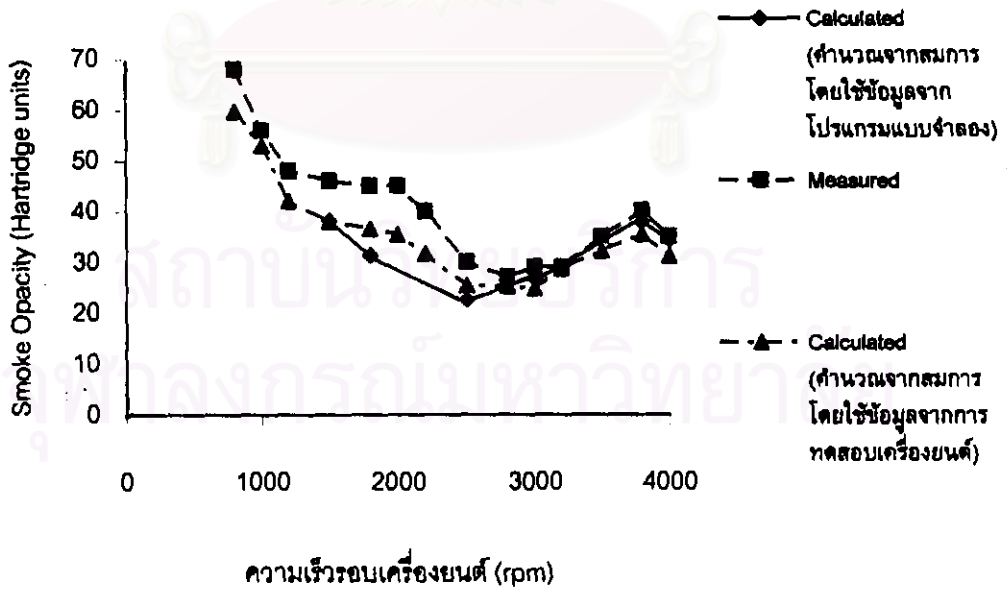
5.3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าปริมาณควันท่ำที่คำนวณโดยโปรแกรมแบบจำลอง ไอเสียกับค่าควันท่ำที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบค่าของไอเสีย โดยจะทำการเปรียบเทียบผลของไอเสียจากการวัดโดยการทดสอบเครื่องยนต์บนเอนจินไดนาโมมิเตอร์ กับค่าของไอเสียจากการทำนายโดยใช้สมการจากการทำสหสัมพันธ์ โดยใช้ข้อมูลป้อนเข้าเป็นข้อมูลสมรรถนะจากการทดสอบเครื่องยนต์ และค่าของไอเสียจากสมการสหสัมพันธ์ โดยใช้ข้อมูลป้อนเข้าจากโปรแกรมแบบจำลองสมรรถนะ โดยผลดังกล่าวแสดงไว้ที่ตารางที่ 5.6 ถึง 5.7 และรูปที่ 5.6 ถึง 5.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าควันดำจากการวัดและการคำนวณ ที่สภาวะคงตัว ณ ความเร็วรอบต่างๆ (ภาระ 50%)



รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าควันดำจากการวัดและการคำนวณ ที่สภาวะคงตัว ณ ความเร็วรอบต่างๆ (ภาระ 100%)

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าของควันท้าจากวิธีการต่างๆ (ภาวะ 50%)

Speed rpm	Smoke Opacity 2 (Hartridge units) จำนวนจากสมการโดยใช้ข้อมูลจากโปรแกรมแบบจำลอง	Smoke Opacity (Hartridge units) จากการวัด	Smoke Opacity 1 (Hartridge units) จำนวนจากสมการโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบเครื่องยนต์
800	-	22	24.9
1000	-	17	24.5
1200	-	19	23.8
1500	23.9	17	23.4
1800	15.2	16	14.2
2000	-	15	13.1
2200	-	12	12.9
2500	14.6	11	12.8
2800	-	11	12.5
3000	14.3	11	12.6
3200	-	12	14.4
3500	-	18	16.8
3800	27.5	22	17.5
4000	32	28	19.1

ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าของควันท้าจากวิธีการต่างๆ (ภาวะ 100%)

Speed rpm	Smoke Opacity 2 (Hartridge units) จำนวนจากสมการโดยใช้ข้อมูลจากโปรแกรมแบบจำลอง	Smoke Opacity (Hartridge units) จากการวัด	Smoke Opacity 1 (Hartridge units) จำนวนจากสมการโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบเครื่องยนต์
800	-	68	59.7
1000	-	56	53.1
1200	-	48	41.9
1500	38.1	48	38.7
1800	31.3	45	36.6
2000	-	45	35.4
2200	-	40	31.7
2500	22.5	30	25.4
2800	-	27	25.2
3000	26.7	29	24.7
3200	-	29	28.7
3500	-	35	32.1
3800	37.8	40	35.4
4000	34.25	35	31.2

จากการเปรียบเทียบค่าวันค่าที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ โดยโปรแกรมแบบจำลองไอเสียโดยข้อมูลป้อนเข้าเป็นข้อมูลจากการทดสอบเครื่องยนต์เพื่อหาวันค่า และโปรแกรมแบบจำลองไอเสียโดยข้อมูลป้อนเข้าเป็นข้อมูลจากการทำนายโดยโปรแกรมแบบจำลองสมรรถนะ จะเห็นว่า ในสภาวะเครื่องยนต์ทำงานที่ ภาระ 100% ค่าวันค่าที่ทำนายจากโปรแกรมแบบจำลองไอเสียโดยข้อมูลป้อนเข้าจากการทดสอบเครื่องยนต์ และข้อมูลป้อนเข้าเป็นข้อมูลสมรรถนะจากการทดสอบนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าวันค่าที่ได้จากการวัดที่สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์เดียวกันให้ค่า COD = 0.817 และ COD = 0.735 ตามลำดับ

จากการคำนวณหาสมรรถนะโดยโปรแกรมแบบจำลอง สามารถทราบถึงผลของการคำนวณพฤติกรรมต่างภายในกระบอกสูบ, แมนิโฟลด์ไอดีและแมนิโฟลด์ไอเสีย ได้ครบรอบวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์โดยแบ่งแสดงผลของการคำนวณเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงของคาบปิด และช่วงของคาบเปิด

โดยช่วงของคาบปิดจะเป็นผลการคำนวณขณะที่วาล์วไอดีและวาล์วไอเสียปิด (จังหวะอัดและจังหวะระเบิด) และช่วงของคาบเปิด(จังหวะคายและจังหวะดูด)เป็นผลการคำนวณขณะที่วาล์วไอดีหรือวาล์วไอเสียเปิด โดยผลของการคำนวณแสดงไว้ที่ภาคผนวก (ญ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย