

การทำนายปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ปล่อยจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

นายณัฐชนน ไชยประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของงานวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREDICTION OF NITROGEN OXIDE GENERATED FROM GAS TURBINE ENGINE

Mr. Natchanon Chaiprasert

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ปล่อยจาก เครื่องยนต์กังหันก๊าซ
โดย	นายณัฐชนน ไชยประเสริฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรณี แผงจันทิก)

ณัฐชนน ไชยประเสริฐ : การทำนายปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่ปล่อยจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ. (PREDICTION OF NITROGEN OXIDE GENERATED FROM GAS TURBINE ENGINE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.อมรชัย อารณวิธานพ, 67 หน้า.

ในปัจจุบันการควบคุมมลภาวะได้กลายเป็นปัญหาที่สำคัญเนื่องจากกฎหมายที่มีความเข้มงวดขึ้นมากขึ้น เครื่องยนต์กังหันก๊าซซึ่งจะถูกใช้เป็นเครื่องจักรต้นกำลังในโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซโดยทั่วไป จะเป็นสาเหตุหนึ่งที่สามารถก่อกำเนิดมลภาวะทางอากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไนโตรเจนออกไซด์ จากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ในงานวิจัยนี้แบบจำลองห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซชนิดที่ใช้กับอุตสาหกรรมการบินได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อที่จะทำนายปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ การสร้างแบบจำลองกระบวนการภายในห้องเผาไหม้จะถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการผลิตในการหาข้อมูลที่เป็นและเงื่อนไขขอบเขตรอบห้องเผาไหม้ และในขั้นตอนที่ 2 จะใช้ข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตและปฏิกิริยาไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิจากไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว และไนโตรเจนออกไซด์ผ่านสารตัวกลางไนตรัสออกไซด์ นำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหล เพื่อที่จะทำนายรูปแบบของก๊าซที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ จากผลการจำลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์คือภาระของเครื่องยนต์หรือปริมาณการผลิตไฟฟ้า สมรรถนะของเครื่องยนต์ อุณหภูมิของอากาศโดยรอบเป็นค่าที่มีผลกระทบมากที่สุดในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ประโยชน์ที่ได้จากผลการจำลองในงานวิจัยชิ้นนี้ จะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ เพื่อที่จะนำมากำหนดกลยุทธ์การเดินเครื่องให้มีปริมาณการเกิดมลภาวะน้อยที่สุด

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

527 14808 21 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : GAS TURBINE / COMBUSTION CHAMBER / NITROGEN OXIDE /
MODELLING / PREDICTION

NATCHANON CHAIPRASERT : PREDICTION OF NITROGEN OXIDE GENERATED
FROM GAS TURBINE ENGINE. ADVISOR : ASST. PROF. AMORNCHAI
ARPORNWICHANOP, D.Eng., 67 pp.

Presently, the emission control of pollutants has become an important issue due to more strict regulation. A gas turbine engine, which is generally used as a mechanical drive in many power generation plants, is among the sources that can generate air pollutants, such as nitrogen oxide, from the burning of fuels in a combustion chamber. In this study, the simulation model of the combustion chamber in an aero-derivative type gas turbine engine is developed with the aim to predict an amount of generated nitrogen oxide. Modeling of the combustion chamber is divided into two steps. First, a process simulator is employed to generate stream data and boundary conditions around the combustion chamber and secondly, based on this information and the combustion kinetics of thermal NO_x, prompt NO_x and N₂O intermediate pathways, fluid dynamic software is used to predict gaseous composition profiles in the combustor. The simulation results have indicated that the engine load, engine performance and ambient temperatures are among the most important parameters, which highly affect the generation of nitrogen oxide. The results obtained from this model-based analysis are beneficial for an understanding of the combustor, leading to the efficient operation of the gas turbine engine in terms of minimizing pollutant generation.

Department :Chemical Engineering.... Student's Signature

Field of Study : ...Chemical Engineering.... Advisor's Signature

Academic Year : ..2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ผู้มีพระคุณท่านแรกและผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณคือ ผศ.ดร. อมรชัย อารมณ์วิธานพอ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอนเพื่อให้การเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ที่สุด

ขอขอบคุณ คุณณัฐระพงศ์ มานีมาน ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมและบำรุงรักษาโรงแยกก๊าซ คุณณัฐระวุฒิ เครือประดับ ผู้จัดการส่วนบำรุงรักษาเครื่องกล และคุณสรวิศ อุษย์วัฒนา ผู้จัดการส่วนบริหารแผนงานบำรุงรักษา และเพื่อนร่วมงานใน บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามสำหรับข้อมูลสนับสนุน คำแนะนำ และการอนุมัติให้ดำเนินการงานภายใต้กรอบงานวิจัย ในขณะที่ต้องปฏิบัติงานประจำของบริษัท

ขอขอบคุณ กลุ่มวิจัยวิศวกรรมกระบวนการเชิงคำนวณโครงการขับเคลื่อนการวิจัย (STAR) ภายใต้โครงการพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 100 ปีที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อจำเริญ ไชยประเสริฐ และคุณแม่ศศิณา ไชยประเสริฐ ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การจำลองกระบวนการเผาไหม้.....	6
2.2 กลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์.....	6
2.3 การจำลองการเกิดไนโตรเจนออกไซด์.....	7
2.4 เทคโนโลยีการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์.....	9
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
3.1 หน่วยปฏิบัติการภายในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ.....	12
3.1.1 GG Compressor.....	13
3.1.2 Air Sealing & Cooling Port.....	15
3.1.3 Combustor.....	16
3.1.4 GG Turbine.....	16
3.1.5 Power Turbine Sealing.....	17
3.1.6 Power Turbine.....	17

บทที่	หน้า
3.2 ทฤษฎีการเกิดไนโตรเจนออกไซด์.....	17
3.2.1 การจำลองไนโตรเจนออกไซด์.....	18
3.2.2 การเกิดและการลดลงของไนโตรเจนออกไซด์ในเปลวเพลิง.....	19
3.2.3 สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนของไนโตรเจนออกไซด์.....	19
3.2.4 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ (Thermal NO).....	20
3.2.5 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว (Prompt NO).....	24
3.2.6 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิง (Fuel NO).....	28
3.2.7 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านสารชั้นกลางไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O Intermediate).....	29
3.3 การจำลองปฏิกิริยาสันดาปในห้องเผาไหม้.....	30
3.3.1 ทฤษฎีสัดส่วนของผสม.....	30
3.3.2 สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนของสัดส่วนของผสม.....	31
4. แบบจำลอง.....	32
4.1 การพัฒนาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ.....	32
4.2 ขั้นตอนการจำลองเครื่องยนต์กังหันก๊าซด้วย HYSYS.....	35
4.2.1 กำหนดสถานะของเชื้อเพลิงและอากาศ.....	36
4.2.2 การหาประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ.....	36
4.2.3 การตั้งค่าปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้.....	37
4.2.4 การหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ.....	38
4.2.5 การหาอัตราส่วน Air Sealing & Cooling.....	39
4.2.6 การพิสูจน์แบบจำลอง.....	39
4.2.7 ค่าขอบเขตที่ได้จากการจำลอง.....	39
4.3 ขั้นตอนการจำลองห้องเผาไหม้ด้วย FLUENT.....	40
4.3.1 การตั้งค่าปัญหา.....	43
4.3.2 การตั้งค่าวิธีการหาคำตอบ.....	45
4.3.3 การแสดงผลลัพธ์จากการหาคำตอบ.....	46
5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
5.1 ผลการวิเคราะห์.....	47
5.2 ผลกระทบจากกำลังการผลิตไฟฟ้า.....	49

บทที่	หน้า
5.3 ผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศ.....	59
5.4 ผลกระทบจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	60
5.5 ผลกระทบจากสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	61
6. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	63
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
6.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	63
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	67

สารบัญภาพ

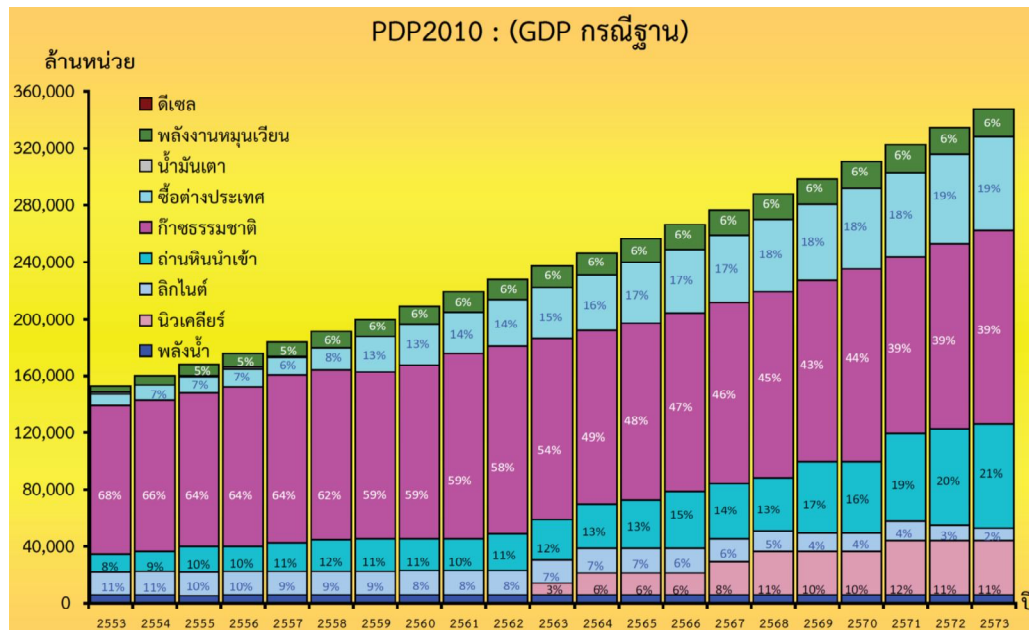
ภาพที่		หน้า
1.1	สัดส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าแยกตามประเภทเชื้อเพลิง.....	2
1.2	ภาพตัดขวางของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ Rolls Royce รุ่น Avon A200.....	3
3.1	ภาพแสดง Process Flow Diagram ของระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ 2 เพลลาขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	13
4.1	ด้านซ้ายแสดงภาพตัดขวางของหัวฉีดเชื้อเพลิง ด้านขวาแสดงรูปทรงเรขาคณิต ของห้องเผาไหม้และหัวฉีดเชื้อเพลิง.....	35
4.2	แสดงการตั้งค่า Reaction Package ในการจำลองปฏิกิริยาเผาไหม้.....	38
4.3	ด้านซ้ายแสดงภาพตัดขวางของหัวฉีดเชื้อเพลิง ด้านขวาแสดงรูปทรงเรขาคณิต ของห้องเผาไหม้และหัวฉีดเชื้อเพลิง.....	41
4.4	แบบจำลองของห้องเผาไหม้ หลังทำการ Meshing	42
4.5	ตัวอย่างการตั้งค่า Mesh Control เพื่อสร้าง Mesh จำลองโครงข่ายเครื่อง ปฏิกรณ์ย่อย ภายในห้องเผาไหม้.....	43
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Engine Load กับปริมาณไนโตรเจนออกไซด์.....	51
5.2	Contour ของ Temperature ที่ 90% Load (K).....	52
5.3	Contour ของ Pressure ที่ 90% Load (Pa).....	53
5.4	Contour ของ Turbulent Kinetic Energy ที่ 90% Load (m^2/S^2).....	54
5.5	Contour ของ Methane Mass Fraction ที่ 90% Load.....	54
5.6	Contour ของ Oxygen Mass Fraction ที่ 90% Load.....	55
5.7	Contour ของ NO Mass Fraction ที่ 90% Load.....	56
5.8	Contour ของ N_2O Mass Fraction ที่ 90% Load.....	56
5.9	Contour ของ Thermal NO Rate ที่ 90% Load ($kgmol/m^3s$).....	57
5.10	Contour ของ Prompt NO Rate ที่ 90% Load ($kgmol/m^3s$).....	58
5.11	Contour ของ N_2O Path NO Rate ที่ 90% Load ($kgmol/m^3s$).....	58
5.12	Contour ของ Velocity Magnitude ที่ 90% Load (m/s).....	59
5.13	ผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศต่อปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์.....	60
5.14	ผลกระทบของค่าความร้อนที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิงต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์	61
5.15	สิ่งสกปรกที่ติดอยู่กับใบพัดของเครื่องอัดอากาศ.....	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทั่วโลกให้ความสำคัญกับเรื่องสิ่งแวดล้อมกันมากขึ้น ความแปรปรวนของสภาวะอากาศและฤดูกาลเป็นผลจากมลภาวะทางอากาศที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้น เนื่องจากความต้องการบริโภคพลังงานในด้านต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น พลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมที่ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนยานพาหนะและใช้ในภาคอุตสาหกรรม พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้านเรือน การใช้พลังงานเหล่านี้ล้วนเป็นต้นกำเนิดของมลภาวะทั้งสิ้น อุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยใช้แหล่งพลังงานจากก๊าซธรรมชาติมากถึง 64% ในปี 2556 และยังมีแนวโน้มที่จะคงมีอัตราส่วนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานอื่นๆ แม้ว่าจะมีการนำเข้าพลังงานและการใช้พลังงานทางเลือกอื่นๆ มากขึ้น ในปี 2573 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน คาดการณ์สัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติเพื่อผลิตไฟฟ้าที่ 39% ดังแสดงในภาพที่ 1.1 แม้ว่าโรงไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำมันและโรงไฟฟ้าถ่านหิน แต่ด้วยปริมาณสัดส่วนกำลังการผลิตที่สูงกว่ามาก อัตราส่วนในการปล่อยมลภาวะทางอากาศยังคงถูกให้ความสำคัญในอันดับต้นๆ โดยกรมควบคุมมลพิษมีการควบคุมปริมาณมลพิษทางอากาศสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซ โดยกำหนดให้มีค่าควบคุมรายปล่อย ตามที่เสนอขออนุญาตในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (EIA)



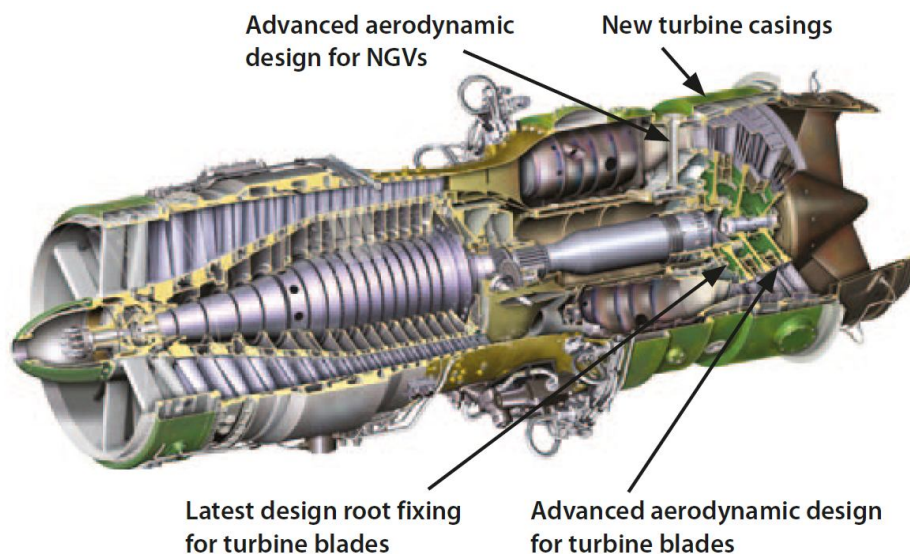
ภาพที่ 1.1 สัดส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าแยกตามประเภทเชื้อเพลิง [1]

โดยทั่วไปโรงไฟฟ้าพลังงานก๊าซจะดำเนินการในลักษณะการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม (combined cycle power plant) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยมีเครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นต้นกำลังหลัก ในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไอเสียที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อผลิตไอน้ำสำหรับเดินเครื่องกังหันไอน้ำที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์กำเนิดไฟฟ้าในระบบโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมเป็นอุปกรณ์หลักที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศจากปฏิกิริยาเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น

เครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ใช้เป็นต้นกำลังในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนมีหลายประเภท เครื่องยนต์กังหันก๊าซชนิดที่ใช้ในการบิน (aero-derivative type) เป็นเครื่องยนต์ประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น โรงแยกก๊าซธรรมชาติ และโรงงานปิโตรเคมีชั้นกลาง เครื่องยนต์ชนิดดังกล่าวที่ผลิตโดย Rolls Royce ขนาดกลางหรือไม่เกิน 27MW จะมีอยู่ 2 รุ่น คือ Rolls Royce: Avon A200 Series ซึ่งมีภาพตัดขวางแสดงดังภาพที่ 1.2 และ Rolls Royce: RB211 DLE 24GT Series สำหรับเครื่องรุ่น RB211 DLE 24GT เป็นเครื่องยนต์ชนิดที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่ำ หรือ Dry Low Emission (DLE) ซึ่งมีการออกแบบห้องเผาไหม้แบบพิเศษให้มีการปลดปล่อยปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ในปริมาณต่ำ โดยมีค่ารับประกันการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่า 25 ppm ที่ความเข้มข้นออกซิเจน 15% โดยมวล ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของการควบคุมการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากปล่องของโรงไฟฟ้ามากซึ่งโดยทั่วไปควบคุมที่ 150 ppm ที่ความ

เข้มข้นออกซิเจน 7% โดยมวล (มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษสำหรับโรงงานในเขตควบคุมมลพิษพิเศษ) อย่างไรก็ตามกรณีของเครื่องยนต์รุ่น Avon A200 จะมีการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในปริมาณที่มาก โดยมีค่ารับประกันการปลดปล่อยปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์อยู่ที่ 70 ppm ที่ความเข้มข้นออกซิเจน 15% โดยมวล หรือ 142 ppm ที่ความเข้มข้นออกซิเจน 7% โดยมวล

เมื่อปริมาณความต้องการไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้โรงไฟฟ้าจำเป็นต้องขยายกำลังการผลิต อย่างไรก็ตามการขยายขนาดโรงไฟฟ้าในเขตควบคุมมลพิษพิเศษจำเป็นต้องจำกัดปริมาณการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ต่อปล่องให้ต่ำกว่า 108 ppm ที่ความเข้มข้นออกซิเจน 7% โดยมวล จะเห็นได้ว่ามาตรฐานการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ดังกล่าวต่ำกว่าค่ารับประกันของเครื่องยนต์รุ่น Avon A200 นอกจากนี้ในการเดินเครื่องปกติมีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนปริมาณกำลังการผลิตตามแต่ละสภาวะกระบวนการผลิต ส่งผลให้ในบางกรณีค่าไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยจากโรงไฟฟ้าซึ่งวัดได้จากระบบวัดมลภาวะแบบต่อเนื่อง (continuous emission monitoring, CEMS) มีค่าสูงกว่าค่าควบคุมอยู่บ่อยครั้ง ทำให้ต้องมีการลดกำลังการผลิตไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุดังกล่าว ดังนั้นการประเมินหาสาเหตุที่ทำให้ค่าไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการปัญหาดังกล่าว



ภาพที่ 1.2 ภาพตัดขวางของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ Rolls Royce รุ่น Avon A200

ปัจจุบันการทำนายปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อน เมื่อพิจารณาการดำเนินจริงของโรงไฟฟ้าในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป จะมีการเก็บข้อมูลการเดินเครื่องกังหันก๊าซ โดยเฉพาะข้อมูลปริมาณเชิงอุณหพลศาสตร์ภายในเครื่องยนต์

กังหันก๊าซเพื่อที่จะตรวจสอบสภาวะการเดินเครื่องและดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพหลัก อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเหล่านี้ยังไม่เพียงพอที่จะสรุปเป็นแนวทางการเดินเครื่องให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะเดียวกันจำเป็นต้องควบคุมปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ให้ต่ำกว่าค่าควบคุมที่กฎหมายกำหนด ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกังหันก๊าซ จึงเป็นเรื่องที่จำเป็น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้กำหนดแนวทางการดำเนินงานเครื่องกังหันก๊าซที่เหมาะสม [2]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณและทำนายการเปลี่ยนแปลงเชิงพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) ของกระบวนการอย่างแพร่หลาย สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องกังหันก๊าซมีความซับซ้อนโดยมีสาเหตุมาจากการไหลวนของไอเสียภายใน การถ่ายเทพลังงานหลายรูปแบบ และผลกระทบทางเคมีที่มีการไหลปั่นป่วนอย่างรุนแรงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เป็นหัวฉีดและห้องเผาไหม้แบบ Swirled Combustor ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลที่มีการเกิดปฏิกิริยาใน Swirled Combustor ด้วย CFD เป็นหัวข้อที่มีความสำคัญ [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทำนายปริมาณการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ พร้อมทั้งสามารถอธิบายผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนออกไซด์
2. เพื่อหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเพื่อให้ได้กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ต้องการและสอดคล้องกับข้อจำกัดด้านปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเครื่องยนต์กังหันก๊าซรุ่น Avon A200 สำหรับใช้ในโรงไฟฟ้า โดยมีขอบเขตของงานวิจัยตามรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษากลไกการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. จำลองระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซเพื่อทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ และทำการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากผลการจำลองและค่าที่ได้เกิดขึ้นจริงในโรงงานงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Aspen HYSYS ในการคำนวณด้านสมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานและใช้โปรแกรม Ansys FLUENT ในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ข้อมูลที่ได้จากการจำลองเครื่องกังหันก๊าซด้วยโปรแกรม Aspen HYSYS จะถูกใช้ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการคำนวณในโปรแกรม Ansys FLUENT

3. ศึกษาปัจจัยของสภาวะการดำเนินงานเครื่องกังหันก๊าซที่มีผลกระทบต่อปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์โดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้น

4. หาสภาวะการดำเนินงานเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงทั้งด้านกำลังการผลิตไฟฟ้าและสิ่งแวดล้อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกังหันก๊าซและผลกระทบจากสภาวะการดำเนินงานที่มีต่อการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องกังหันก๊าซ
2. สามารถหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกังหันก๊าซ จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่กระทบต่อปริมาณการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งเกี่ยวข้องกับหัวข้อวิจัยในด้านต่างๆ ดังนี้ การจำลองกระบวนการเผาไหม้ กลไกการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ การจำลองการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และเทคโนโลยีการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์

2.1 การจำลองกระบวนการเผาไหม้

การจำลองการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ จำเป็นต้องเข้าใจปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลัก และปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง การทำนายปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับอุตสาหกรรมการบิน ถูกนำเสนอโดย Louis [4] โดยพบว่า ไนโตรเจนออกไซด์ส่วนมากจะเกิดในบริเวณห้องเผาไหม้ปฐมภูมิ (primary combustion zone) กลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ได้ถูกอธิบายและถูกพบว่า ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นอย่างเป็นนัยสำคัญก็ต่อเมื่อมีการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิของเปลวเพลิงสูงกว่า 1,700 K แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากพื้นฐานของสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิของเปลวเพลิงและระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ (residence time) ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องเผาไหม้ ค่าต่างๆเหล่านี้จะถูกใช้เป็นตัวแปรควบคุมที่สำคัญ สำหรับใช้ในการที่จะทำนายค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ ความสัมพันธ์รูปแบบใหม่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ที่จะเพิ่มขีดความสามารถของแบบจำลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิเข้าห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับระดับความสูงในการติดตั้งเครื่องยนต์เทียบกับระดับน้ำทะเล จากการพิจารณาตัวแปรที่ถูกพัฒนาขึ้นมา ทำให้การทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ได้ถูกต้องมากขึ้น

2.2 กลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

Melissa [5] ทำการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ของมีเทนและอีเทน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติ และยังคงศึกษาถึงรายละเอียดในเชิงลึกของกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ การประยุกต์ใช้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกพัฒนาขึ้นมา สามารถนำมาใช้งานในช่วงความดันของการเผาไหม้กว้างตั้งแต่ 1 บรรยากาศถึง 40 บรรยากาศ ซึ่งครอบคลุมถึงช่วงการใช้งานของ

เครื่องยนต์กังหันก๊าซโดยทั่วไป จากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของเปลวเพลิงหรืออุณหภูมิของปฏิกิริยาเผาไหม้มีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ในงานวิจัยได้ใช้แบบจำลอง Perfectly Stirred Reactor (PSR) และ Plug Flow Reactor (PFR) เพื่อจำลองกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ การศึกษาพบว่าแบบจำลอง Perfectly Stirred Reactor ให้ผลที่สอดคล้องกับช่วงที่เป็นเปลวแบบปั่นป่วน (turbulent flame zone) ในขณะที่ Plug Flow Reactor ให้ผลที่สอดคล้องกับช่วงหลังเปลว (post flame zone)

2.3 การจำลองการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

Barths [6] ได้ทำการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การปลดปล่อยมลภาวะทางอากาศที่เกิดจากห้องเผาไหม้แบบ Diffusion Flame งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ Computational Fluid Dynamics (CFD) โดยใช้แบบจำลอง Unsteadily Flamelet และการนิยามค่าเริ่มต้น (initial) เงื่อนไขค่าขอบเขต (boundary condition) และอัตราการกระจายตัวเชิงปริมาณที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-depend scalar dissipation rate) จากการวิเคราะห์วิถีการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ พบว่า 67% มาจากวิถีอุณหภูมิ (thermal path) และอีก 33% เกี่ยวข้องกับวิถีทันทีทันใด (prompt path)

Vincent [7] ดำเนินงานวิจัยการจำลองเชิงตัวเลขของการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องยนต์กังหันก๊าซโดยใช้ CFD โครงข่ายเครื่องปฏิกรณ์ (reactor network) ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อจำลองการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการที่จะแยกขอบเขตการเกิดปฏิกิริยาเป็นส่วนๆ โดยแต่ละหน่วยพิจารณาให้เป็น Perfectly Stirred Reactor และเมื่อนำหน่วยเหล่านั้นมาต่อกันเป็นโครงข่าย เรียกว่า Chemical Reactor Network (CRN) ซึ่งมีประโยชน์ในการระบุรายละเอียดขององค์ประกอบของสารแต่ละชนิด และอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความไวต่อการเปลี่ยนแปลง เพื่อที่จะประเมินผลกระทบของความชื้นภายในอากาศและกำลังการผลิตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่มีต่อการทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ค่าปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จากการทำนายให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในแง่ของปริมาณและแนวโน้มจากกรณีศึกษา โดยใช้เครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่ความดันในห้องเผาไหม้ที่ 15 บรรยากาศ ท้ายที่สุด วิธีการใช้ Reactor Network ได้แสดงให้เห็นว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในแง่ของความแม่นยำในการประมาณปริมาณมลภาวะอย่างง่าย รวมทั้งใช้เวลาในการคำนวณไม่มากนัก

Lebedev [8] ทำการวิจัยเกี่ยวกับการจำลองเครื่องปฏิกรณ์อย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายรายละเอียดพฤติกรรมในขอบเขตที่มีคุณลักษณะแตกต่างกันเช่น บริเวณที่มีปริมาณเชื้อเพลิง

หนาแน่น บริเวณขอบของเปลวเพลิง บริเวณที่ใกล้ผนังของห้องเผาไหม้ และบริเวณที่มีการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนการเผาไหม้ ของห้องเผาไหม้แบบ Diffusion แบบจำลองปฏิกรณ์ได้ถูกพัฒนาเพื่อทำนายดัชนีชี้วัดสำหรับมลภาวะทางอากาศหลายชนิด การทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ขึ้นอยู่กับการประยุกต์แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์อย่างยิ่ง ในงานวิจัยชิ้นนี้มีการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ทั้งหมด 3 รูปแบบดังนี้

1. กลไกของ Konnov (<http://homepages.vub.ac.be/~akonnov>)
2. GRI-Mech 3.0 (http://www.me.berkeley.edu/gri_mech)
3. กลไกของ Dautov และ Starik (DS) ฉบับปรับปรุง

กลไกปฏิกริยารูปแบบของ Dautov และ Starik ทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์และอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ กลไกของ Konnov และ GRI-Mech 3.0 จุดแตกต่างที่สำคัญระหว่างกลไกทั้ง 2 รูปแบบคือ แบบจำลองกลไกของ Dautov และ Starik จะมีผลกระทบอย่างยิ่งกับ Prompt NO_x ซึ่งเป็นวิถีของการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงหนาแน่น และมีนัยสำคัญต่ออัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง GRI-Mech 3.0 มีความเป็นไปได้ที่จะจำแนกความแตกต่างระหว่างแต่ละกลไกการไนโตรเจนออกไซด์ ที่จะกระทบต่อการเกิดมลภาวะ ทั้งในแง่ของผลรวมออกไซด์ของไนโตรเจนและไนโตรเจนไดออกไซด์ของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบิน อย่างไรก็ตาม ยังมีความจำเป็นต้องการศึกษาในภาคการทดลองและทฤษฎีเพิ่มเติม ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้และการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาที่เกิดปฏิกริยาในห้องเผาไหม้ (residence time) เป็นผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นของดัชนีชี้วัดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ในทางตรงกันข้ามดัชนีชี้วัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจะลดลง ในการพัฒนาแบบจำลองปฏิกรณ์และกลไกการเกิดปฏิกริยาเผาไหม้ของเคโรซีน (kerosene) สามารถนำไปใช้ประมาณการปริมาณองค์ประกอบของมลภาวะรวมถึงองค์ประกอบของซัลเฟอร์

2.4 เทคโนโลยีการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่หลากหลายที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องยนต์กักทันก๊าซได้ โดยสามารถพิจารณาเป็นกลุ่มได้ดังนี้ (1) กลุ่มที่ใช้การฉีดน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ (2) กลุ่มที่มีการออกแบบห้องเผาไหม้ให้เป็น Dry low NO_x (DLN) และ (3) การใช้

Selective Catalytic Reduction (SCR) โดยแต่ละวิธีการสามารถลดปริมาณมลภาวะไนโตรเจนออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีการก็มีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

การฉีดน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้สามารถที่จะลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ลงได้ถึง 25 ppm อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ แต่ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้น การฉีดน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้จะมีผลกระทบข้างเคียงโดยจะต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงมากขึ้น เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน เพื่อที่จะระเหยน้ำให้กลายเป็นไอ ซึ่งจะเป็นการลดประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องยนต์ทั้งกันก๊าซ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการฉีดน้ำ ข้อสังเกตเพิ่มเติมน้ำที่ใช้ในการฉีดเข้าไปในเครื่องยนต์จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงมาก สิ่งปนเปื้อนใดๆในน้ำที่ฉีดเข้าไปจะทำให้เกิดการสะสมบริเวณใบพัดของเครื่องยนต์ เป็นการลดประสิทธิภาพเครื่องทำให้จำเป็นต้องทำการบำรุงรักษามากขึ้นกว่าเดิม

ห้องเผาไหม้แบบ Dry Low NOx ใช้หลักการผสมอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้โดยไม่มีเชื้อเพลิงที่เจือจาง (lean premixed) และการเผาไหม้แบบหลายตอน (staged combustion) วิธีการดังกล่าวสามารถลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ได้มากถึง 9 ppm ปฏิกริยาเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศมากทำงานเหมือนตัวระบายความร้อนเพื่อที่จะลดอุณหภูมิในการเผาไหม้ การผสมอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ให้ผลดีในแง่การกระจายตัวของสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดบริเวณที่มีความร้อนสูง ซึ่งจะทำให้เกิดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่มาก ห้องเผาไหม้แบบ Dry Low NOx มีขีดจำกัดอยู่ที่เสถียรภาพของเปลวเพลิง ยังต้องการให้ได้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์น้อยเท่าไรหรือเดินเครื่องยนต์แบบไม่เต็มกำลัง อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงต้องมากขึ้นเท่านั้น หากเพิ่มขึ้นเรื่อยๆในที่สุดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงก็จะมาถึงจุดที่ต่ำกว่าจุดที่ติดไฟ (lower flammability limit) ของก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาเสถียรภาพของเชื้อเพลิง เป็นผลทำให้ห้องเผาไหม้แบบ Dry Low NOx มีช่วงการเดินเครื่องที่จำกัดและไม่สามารถเดินเครื่องแบบเปลี่ยนแปลงกำลังเครื่องยนต์ตลอดเวลาได้

SCR เป็นเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษหลังกระบวนการเผาไหม้ โดยการใช้แอมโมเนียในการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ แอมโมเนียจะถูกฉีดผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาให้เปลี่ยนเป็นไนโตรเจนและน้ำ เทคโนโลยี SCR มีให้เลือกหลายชนิดสำหรับใช้งานร่วมกับเครื่องยนต์ทั้งกันก๊าซในระบบพลังงานความร้อนร่วมพื้นฐาน ระบบ SCR จะมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงพิเศษ 400 – 600 องศาเซลเซียส และชนิดที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำไป 200 – 400 องศาเซลเซียส ในกรณีเครื่องยนต์ทั้งกันก๊าซชนิดที่ไอเสียผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำ อุณหภูมิของไอเสียจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่สามารถเลือกใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำไปได้

ถ้าใช้เทคโนโลยี SCR ร่วมกับห้องเผาไหม้แบบ Dry Low NOx หรือการฉีดน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ ปกติจะสามารถลดค่าไนโตรเจนออกไซด์ได้ต่ำมากถึง 2.5 ppm ของระบบพลังงานความร้อนร่วม และ 5 ppm ของระบบพื้นฐาน มลภาวะจากแอมโมเนีย (ammonia slip) ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ต้องคำนึงถึงในระบบ SCR โดยที่ Ammonia Slip เกิดจากแอมโมเนียที่ฉีดเข้าไปผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาแต่ไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่บริเวณค่าไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกประเด็นของการเลือกใช้ SCR เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตจากโลหะหนัก เช่นวานาเดียมและไททาเนียม

การเติมไฮโดรเจนเข้าไปในเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปริมาณมลภาวะไนโตรเจนออกไซด์ โดยไม่มีปัญหาและข้อจำกัดอื่นเหมือนกับวิธีการควบคุมไนโตรเจนออกไซด์ในรูปแบบอื่น วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แอมโมเนียหรือตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถหลีกเลี่ยงข้อจำกัดด้านจุดที่ต่ำกว่าจุดที่ติดไฟ และยังสามารถทำให้กระบวนการเผาไหม้ยังคงมีเสถียรภาพที่เชื้อเพลิงบางกว่าการใช้ห้องเผาไหม้แบบ Dry Low NOx เพราะไฮโดรเจนมีจุดที่ต่ำกว่าจุดที่ติดไฟ ที่ต่ำกว่ามีเทนมาก ดังนั้นจุดที่ต่ำกว่าจุดที่ติดไฟของส่วนผสมจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเติมไฮโดรเจนเพียง 10% จะช่วยลดอัตราส่วนผสมระหว่างมีเทนและอากาศจาก 0.53 เหลือ 0.49 ในประเด็นของความเสถียรภาพของเปลวเพลิง การเติมไฮโดรเจนยังช่วยเพิ่มความเสถียรขององค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยทั่วไปส่วนผสมของก๊าซธรรมชาติสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดปัญหาเสถียรภาพของเปลวเพลิง การสันสเทือนภายในห้องเผาไหม้ มลภาวะ การจุดระเบิดก่อนจังหวะ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ และปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเดินเครื่อง การควบคุมส่วนผสมของเชื้อเพลิงได้บางส่วนโดยการเติมไฮโดรเจน จะช่วยให้เราสามารถแก้ไขปัญหาค่าความไม่เสถียรของห้องเผาไหม้ และช่วยไม่ให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักร จากการสันสเทือน [9]

ปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนหนึ่งที่สนใจการออกแบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ทำให้การปล่อยปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ลดลง Shigeru [10] ได้ศึกษาปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงเจือจางและเชื้อเพลิงเจือจางพิเศษ ทำให้สามารถออกแบบห้องเผาไหม้แบบปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์แบบต่ำเป็นพิเศษ ตัวอย่างเช่นการทดลองในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดกลางหรือ 20 MW ที่ถูกออกแบบตามหลักการดังกล่าว มีการฉีดส่วนผสมของเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเรียกว่า หัวฉีดปฐมภูมิ (primary injector) และหัวฉีดทุติยภูมิ (secondary injector) มลภาวะและคุณลักษณะของการเผาไหม้ได้ถูกประเมินที่สภาวะอุณหภูมิอากาศ 600 K และความดัน 0.8 Mpa การออกแบบในลักษณะนี้ แม้ว่าเราจะเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงให้ทางหัวฉีดทุติยภูมิก็ตาม แต่ถ้าเราสามารถควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เข้าหัวฉีดปฐมภูมิได้ ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่ได้ก็เกือบที่จะไม่แตกต่างกัน จากการวิจัยพบว่าการสันสเทือนของห้องเผาไหม้ชนิดที่มี 2 หัวฉีด จะมี

โอกาสที่จะเกิดปัญหาน้อยมาก โดยทั่วไปจะเกิดการสิ้นสะท้อนในห้องเผาไหม้อย่างรุนแรง ถ้าหากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเทียบเท่าหรือมากกว่า 0.8 ในกรณีของห้องเผาไหม้ชนิดหัวฉีดเดียว

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 หัวข้อซึ่งประกอบด้วย หน่วยปฏิบัติการภายในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ทฤษฎีการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และการจำลองปฏิกิริยาสันดาปในห้องเผาไหม้โดยมีรายละเอียดดังนี้

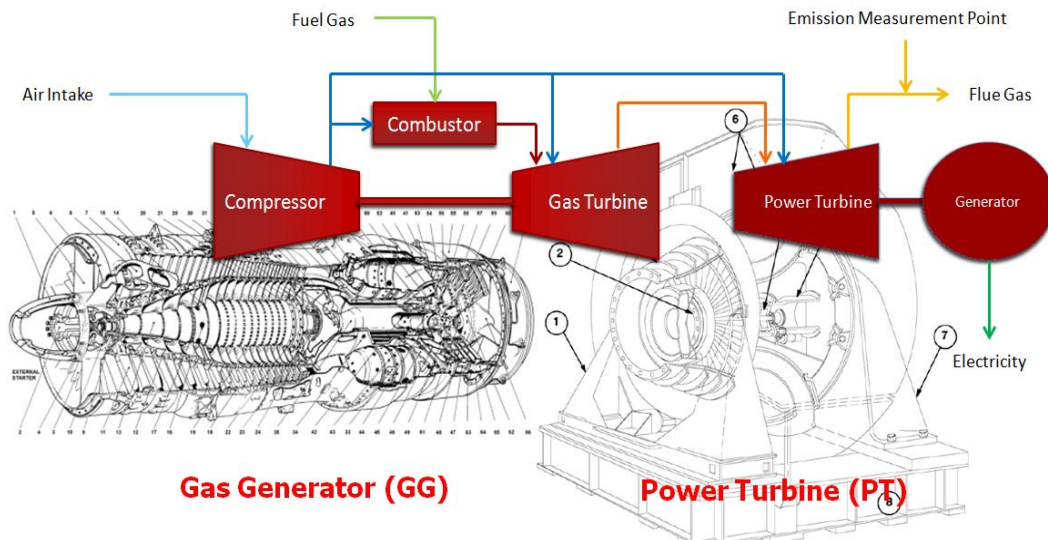
3.1 หน่วยปฏิบัติการภายในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซจะคล้ายกับเครื่องกังหันไอน้ำ แต่จะแตกต่างกันที่ชนิดของตัวกลางโดยกังหันไอน้ำจะใช้พลังงานจากไอน้ำเป็นตัวขับเคลื่อน แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกลขณะที่ไอน้ำวิ่งผ่านใบพัด พร้อมกับขยายตัว (expansion) ส่วนเครื่องกังหันก๊าซนั้นตัวที่ขับเคลื่อนจะเป็นก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ แล้วส่งเข้าตัวกังหัน เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานกลและนำไปใช้ประโยชน์เป็นต้นกำลังให้กับระบบ

การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซจะประกอบไปด้วยเครื่องอัดอากาศ (compressor) ต่ออยู่บนเพลลาเดียวกับชุดกังหันก๊าซ (gas turbine) ก๊าซร้อนที่ออกจากชุดกังหันก๊าซจะถูกนำไปใช้ขับเคลื่อนต้นกำลัง (power turbine) ซึ่งต่อตรงไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเริ่มเดินเครื่อง อากาศจะถูกดูดจากภายนอกเข้าหาเครื่องอัดอากาศและถูกอัดจนมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นอากาศจะถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ซึ่งใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ ก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้จะถูกส่งไปยังตัวกังหัน ทำให้กังหันหมุนเกิดงานขึ้นและไปขับเครื่องอัดอากาศ และขณะเดียวกันก็ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย ความดันของก๊าซเมื่อผ่านตัวกังหันจะลดลงและผ่านออกมาที่บรรยากาศ

ปกติห้องเผาไหม้จะสร้างด้วยโลหะทนความร้อนสูง แต่เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่เข้าไปขับเคลื่อนตัวกังหันมีขีดจำกัด ดังนั้นอากาศประมาณ 1/6 ของอากาศอัดทั้งหมด จะถูกใช้ในห้องเผาไหม้ ส่วนที่เหลือก็จะทำหน้าที่ผสมกับก๊าซร้อนเพื่อให้เกิดการขยายตัว (expansion process) และเกิดกำลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อถูกส่งเข้าสู่เครื่องกังหันก๊าซ อุณหภูมิของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ (combustion zone temperature) อยู่ระหว่าง 1650 – 2250 องศาเซลเซียส แต่ก๊าซร้อนที่ออกมาจากห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิประมาณ 550 – 950 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าสู่เรือนกังหัน เพื่อขับเคลื่อนต่อไป

พลังงานที่ผลิตจากเครื่องกังหันก๊าซจะนำไปขับเครื่องอัดอากาศประมาณ 60% ส่วนที่เหลือจะนำไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ประกอบช่วยงานอย่างอื่น



ภาพที่ 3.1 Process Flow Diagram ของระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ 2 เพลาขับกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

หน่วยปฏิบัติการในเครื่องยนต์กังหันก๊าซจะประกอบไปด้วย เครื่องอัดก๊าซภายในเครื่องยนต์ (GG compressor) ช่องลมของอากาศที่ใช้ในการซีลและทำความเย็น (air sealing & cooling port) ห้องเผาไหม้ (combustor) กังหันก๊าซภายในเครื่องยนต์ (GG turbine) ช่องซีลกังหันต้นกำลัง (power turbine Sealing) และกังหันต้นกำลัง (power turbine) ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดของหน่วยปฏิบัติการต่างๆดังนี้

3.1.1 GG Compressor

GG Compressor เป็นเครื่องอัดอากาศชนิด Axial Flow Compressor ซึ่งให้อัตราการไหลเชิงมวลสูงมากในขณะที่อัตราส่วนความดัน (pressure ratio) ที่ได้อยู่ที่ประมาณ 6 – 12 เท่าบรรยากาศ ขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องยนต์แต่ละรุ่น สำหรับรุ่นที่ใช้ในการศึกษาจะอยู่ที่ประมาณ 6.2 บรรยากาศ อากาศจะถูกดูดเข้ามาทางช่องดูดอากาศ (air intake) โดยอากาศบริเวณที่ตั้งของเครื่องยนต์จะถูกแรงดูดของเครื่องอัดอากาศ (suction) ผ่านตัวกรอง (air intake filter) เพื่อป้องกันวัตถุแปลกปลอมไม่ให้เข้ามาทำความเสียหายต่อเครื่องยนต์ อากาศที่ถูกอัด (compressed air) จะไหลออกทางด้านขาออก (discharge) ของเครื่องอัดอากาศ โดยทั่วไปเราจะเรียกความดันทางด้านขา

นอกจาก Compressor Discharge Pressure หรือ CDP เป็นค่าที่สำคัญในการควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ เพลลาของเครื่องอัดอากาศจะได้รับกำลัง (GG shaft power) จากกังหันก๊าซของเครื่องยนต์ซึ่งอยู่บนเพลลาเดียวกัน

การทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซในสภาวะที่ความเร็วต่ำ เครื่องอัดอากาศอาจเกิดปัญหาเรื่อง Surge หรือสภาวะที่กำลังของเครื่องอัดอากาศไม่เพียงพอที่จะดูดและส่งอากาศออกไปได้ เกิดการไหลย้อนทิศทางกลับไปกลับมา ทำให้พลังงานจำนวนมากถูกสะสมในเครื่องอัดอากาศ และอาจก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อเครื่องอัดอากาศได้ โดยทั่วไปทางผู้ผลิตเครื่องยนต์จะสร้างกลไกเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Surge ในสภาวะที่เครื่องยนต์หมุนด้วยความเร็วต่ำ ซึ่งเรียกรวมๆว่าระบบ Anti-surge ซึ่งประกอบด้วย

- Variable Inlet Guide Vane เป็นใบพัดที่อยู่กับโครงของเครื่องยนต์ซึ่งจะไม่หมุนไปกับเพลลา ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องอัดอากาศ โดยการปรับองศาของใบพัดให้ต้านการไหลของอากาศ การลดอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะทำให้เครื่องอัดอากาศต้องการกำลังลดลง จึงหลีกเลี่ยงการเข้าสู่สภาวะ Surge ได้ Variable Inlet Guide Vane มีทั้งชนิดชุดเดียว (single-stage guide vane) และหลายชุด (multi-stage guide vane) ที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมอัตราการไหลที่ดีกว่า

- Bleed Valve เป็นลิ้นปิดเปิดอยู่ทางด้านขาออกของเครื่องอัดอากาศ โดยปกติช่วงเริ่มเดินเครื่องในสภาวะที่เพลลาภายในเครื่องยนต์มีกำลังต่ำ การลดปริมาณกำลังที่ต้องการของเครื่องอัดอากาศ สามารถทำได้โดยเปิดทิ้ง Compressed Air ออกไปรวมกับท่อไอเสียบางส่วน เป็นการลด Compressor Discharge Pressure ทำให้ Pressure Ratio ของเครื่องอัดอากาศลดลง เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันสภาวะ Surge

- Split Shaft Design เป็นการออกแบบให้มีเพลลาของเครื่องยนต์ซ้อนกันหลายชั้น เช่นแบ่งเครื่องอัดอากาศออกเป็นเครื่องอัดอากาศความดันต่ำ (LP compressor) เครื่องอัดอากาศความดันปานกลาง (IP compressor) และเครื่องอัดอากาศความดันสูง (HP compressor) โดยที่เครื่องอัดอากาศแต่ละชุดมีเพลลาและได้รับกำลังอิสระจากกัน (ความเร็วอิสระจากกัน) โดยต่อเข้ากับกังหันที่อิสระเช่นกัน กล่าวคือ HP Compressor ต่อกับ HP Turbine, IP Compressor ต่ออยู่กับ IP Turbine และ LP Compressor ต่ออยู่กับ LP Turbine ซึ่งเพลลาแต่ละชุดจะมีสภาวะ Surge ที่อิสระจากกัน ถ้าหากชุดใดเข้าใกล้ Surge หรือเริ่มที่จะเกิดการไหลย้อนกลับ อัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องอัดอากาศแต่ละชุดซึ่งเป็นค่าเดียวกัน จะลดลงเป็นการลดกำลังที่เครื่องอัดอากาศต้องใช้แต่ละชุด

สำหรับการเดินเครื่องยนต์กังหันก๊าซในสภาวะที่ใช้งานจริง กลไกเพื่อป้องกันการเกิด Surge ในเครื่องอัดอากาศจะไม่ได้ใช้งาน หรือ Variable Inlet Guide Vane เปิดสุด Bleed Valve ปิดสุด เนื่องจากที่สภาวะใช้งานจริงเพลลาของเครื่องยนต์จะมีกำลังมากพอที่จะขับเครื่องอัดอากาศได้อยู่แล้ว และใช้งานห่างจากบริเวณที่เกิด Surge เราจึงไม่ศึกษาในกรณีนี้ กลไก Anti-surge ทำงาน ในงานวิจัยชิ้นนี้ เครื่องอัดอากาศเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญที่จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซมากที่สุด

3.1.2. Air Sealing & Cooling Port

ในการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ อากาศที่ถูกอัด (compressed air) ทั้งหมดอาจไม่ได้ถูกส่งเข้าไปในห้องเผาไหม้ (combustor) แต่อากาศที่ถูกอัดส่วนหนึ่งจะถูกดึงออกผ่านทาง Air Sealing & Cooling Port ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของโพรงอากาศภายในตัวเครื่องยนต์กังหันก๊าซ และต่อท่อออกจากขาออกของเครื่องอัดอากาศ โดยอากาศที่ถูกดึงออกมาจะมีอัตราการไหลเชิงมวลตั้งแต่ 5 – 15% ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นความเร็วในการหมุนของเครื่องยนต์ สภาพของซีลภายในเครื่องยนต์ โดยหน้าที่ของ Sealing & Cooling Air ที่ถูกดึงออกมามีดังนี้

- ใช้ในการ Sealing น้ำมันบริเวณลูกปืน (bearing) ของเครื่องยนต์ เป็นที่แน่นอนว่าเครื่องจักรหมุนจำเป็นต้องมีลูกปืนที่เป็นตัวรองรับน้ำหนักและแรงเหวี่ยงของเพลลาขณะหมุน ระบบน้ำมันเครื่องของเครื่องยนต์ จะฉีคน้ำมันผ่านเครื่องสูบน้ำมันเข้าไปในลูกปืนเพื่อหล่อลื่นและหล่อเย็นลูกปืน แต่ถ้าหากไม่มี Sealing Air น้ำมันที่ฉีตเข้าไปในลูกปืน ก็จะสามารถรั่วผ่านซีลของแกนเพลลาออกมาสะสมภายในช่องว่างของเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำให้เครื่องยนต์ชำรุดเสียหายจากการเกิดไฟไหม้โดยน้ำมัน อากาศ และความร้อนจากการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ได้ ปริมาณ Sealing Air ที่ใช้ขึ้นอยู่กับสภาพของซีล ระยะช่องว่างระหว่างซีลกับแกนเพลลาเป็นหลัก

- ใช้ในการ Cooling โลหะภายในเครื่องยนต์ที่ต้องรับความร้อนสูงมาก โดยเฉพาะ Nozzle Guide Vane ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ต้องรับความร้อนมากที่สุดในเครื่องยนต์ Nozzle Guide Vane จะเป็นองค์ประกอบหลักที่เป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ เป็นองค์ประกอบที่ทำให้ต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อทำการซ่อมใหญ่โดยถอดชิ้นส่วนทุกชิ้นออกมาตรวจสอบ และเปลี่ยนองค์ประกอบที่ได้รับความร้อนสูง สำหรับเครื่องยนต์ชนิดที่ใช้กับอุตสาหกรรมการบินแล้ว ปกติจะมีช่วงอายุประมาณ 24,000 – 36,000 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับเครื่องยนต์แต่ละรุ่น ถ้าหากเครื่องยนต์ไม่มี Cooling Air ไปหล่อเย็นชิ้นส่วนเหล่านี้ ก็จะเกิดการหลอมละลาย จนทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงจากชิ้นส่วนที่หลุดเข้าไปชนกับกังหันของเครื่องยนต์ และกังหันกำลัง

Air Sealing & Cooling Port จะแยกอากาศที่ถูกอัดออกไปเป็น Sealing & Cooling Air และเป็น Combustion Air ที่จะเข้าไปในห้องเผาไหม้

3.1.3 Combustor

ห้องเผาไหม้เป็นหน่วยปฏิบัติการที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ เชื้อเพลิงจะต้องมีความดันมากกว่า Compressor Discharge Pressure เชื้อเพลิงกับอากาศบางส่วนจะถูกผสมกันก่อนเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ (combustion mixture) เปลวเพลิงบริเวณนี้เราเรียกว่าปฐมภูมิ (primary zone) และอากาศส่วนที่เหลือจะผ่านเข้ามาทางรูเล็กๆของผนังห้องเผาไหม้ (combustion liner hole) เข้ามาทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงส่วนที่เหลือ เราเรียกรวมบริเวณทุติยภูมิ (secondary zone) อากาศที่ไม่ได้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ จะมีหน้าที่พิเศษอีก 3 หน้าที่คือ

- Flame Lining ทำหน้าที่ควบคุมรูปร่างของเปลวเพลิงให้อยู่ตามแกนของห้องเผาไหม้ เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของไอเสียร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเผาไหม้ ให้ตรงเข้าไปปั่นกังหันก๊าซ และไม่ให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนโดยรอบของผนังห้องเผาไหม้

- Flame Cooling จากไอเสียที่ร้อนของบริเวณเปลวปฐมภูมิ เมื่อถูกอากาศที่ถูกอัดซึ่งเย็นกว่า ก็เสมือนทำหน้าที่ในการทำความเย็นให้เปลวเพลิง ไม่ให้เปลวมีความร้อนสูงเกินไปจนกระทั่งหลอมละลาย Nozzle Guide Vane

- Expansion Air เป็นหน้าที่สุดท้ายที่มีความสำคัญในมุมมองการผลิต คืออากาศในส่วนนี้ที่รวมตัวกับไอเสียร้อน จะเกิดการขยายตัวจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้เกิดงานขึ้นจำนวนมาก ซึ่งงานในส่วนนี้จะถูกส่งไปให้กังหันเครื่องยนต์ซึ่งเป็นหน่วยปฏิบัติการถัดไป

3.1.4. GG Turbine

กังหันภายในเครื่องยนต์ เป็นหน่วยปฏิบัติการที่มีหน้าที่ดูดซับพลังงานจากเสียที่ออกมาจากห้องเผาไหม้ ประกอบไปด้วย Nozzle Guide Vane และ Turbine Blade โดย Nozzle Guide Vane จะเปลี่ยน Potential Energy ของไอเสียให้กลายเป็น Kinetic Energy โดยผ่านช่อง Nozzle ให้ความเร็วเพิ่มขึ้น เนื่องจาก Turbine Blade จะดูดซับพลังงานในรูปแบบของ Kinetic ได้ง่ายกว่า ก๊าซที่ผ่านออกจากกังหันก๊าซ จะเรียกว่าไอเสียจากเครื่องยนต์ ก่อนเข้าไปยังหน่วยปฏิบัติการถัดไป

กำลังที่กังหันก๊าซดูดซับออกมาได้จะถูกส่งไปให้เครื่องอัดอากาศ (GG shaft power) ผ่านทางเพลาร่วมกันของกังหันก๊าซและเครื่องอัดอากาศ

3.1.5. Power Turbine Sealing

ช่องซีลกังหันต้นกำลัง หน่วยปฏิบัติการนี้จะทำหน้าที่เป็น Mixer ระหว่างไอเสียจากเครื่องยนต์ (GG exhaust gas) กับ Sealing & Cooling Air ที่ถูกนำไปใช้ในหน้าที่ต่างๆ ตามที่อธิบายในหัวข้อของ Air Sealing & Cooling Port จะถูกส่งกลับมารวมที่หน่วยปฏิบัติการนี้ ใช้ออกของช่องซีลกังหันต้นกำลัง ก็จะเป็นกำลังของอากาศร้อนที่จะส่งเข้าไปให้กังหันต้นกำลัง (power turbine inlet gas)

3.1.6. Power Turbine

กังหันต้นกำลัง เป็นหน่วยปฏิบัติการสุดท้ายในระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับกำลังที่เหลือจากกังหันภายในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ หน้าที่และหลักการทำงานจะเหมือนกับ GG Turbine แต่ใช้งานกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ส่วนกำลังของเพลาก็จะนำไปขับหน่วยผลิตไฟฟ้า (power generator) เพลาของกังหันกำลังจะหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ เนื่องจากต้องการผลิตไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ ไอร้อนที่ออกจากกังหันต้นกำลัง (PT exhaust) จะเหลืองานในรูปแบบของความร้อน โดยปกติจะถูกดูดซับโดยระบบ Waste Heat Recovery Unit หรือระบบหม้อต้มไอร้อน (waste heat boiler)

3.2 ทฤษฎีการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

มลภาวะที่เรียกว่าไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จะประกอบไปด้วยไนตริกออกไซด์ (NO) เป็นองค์ประกอบหลัก และยังมีไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เป็นองค์ประกอบรองตามลำดับ ไนโตรเจนออกไซด์เป็นต้นตอของปัญหาหมอกควัน (photochemical electric) ซึ่งก่อให้เกิดฝนกรด และยังเป็นตัวทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศอีกด้วย เนื่องจากไนโตรเจนออกไซด์เป็นมลภาวะทางอากาศที่สำคัญ การจำลองการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ จะเป็นเครื่องมือช่วยในการอธิบายการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และช่วยให้สามารถวางแผนการดำเนินงานเพื่อควบคุมไนโตรเจนออกไซด์

3.2.1 การจำลองไนโตรเจนออกไซด์

แบบจำลองไนโตรเจนออกไซด์โดยพิจารณาพลศาสตร์ของไหล (fluid dynamics) จะช่วยทำนายการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากวิถีต่างๆ เช่น วิถีอุณหภูมิ (thermal path) วิธีทันทีทันใด (prompt path) การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ภายในเชื้อเพลิง (fuel path) และการใช้ไปของไนโตรเจนออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้ซ้ำ (reburning) ในระบบของการเผาไหม้ได้

Ansys FLUENT เป็นโปรแกรมที่สามารถนำมาใช้ในการจำลองพลศาสตร์การไหลของของไหลในกระบวนการ ในการประยุกต์ใช้โปรแกรม Ansys FLUENT สำหรับจำลองการเผาไหม้และการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ในห้องเผาไหม้จะเป็นต้องทราบปฏิกิริยาเผาไหม้ภายใน งานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ ที่พัฒนาโดย Department of Fuel and Energy ของ University of Leeds ประเทศอังกฤษ [11] และเอกสารทางวิชาการที่เผยแพร่ให้สาธารณะ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้โปรแกรม Ansys FLUENT ในการศึกษาการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ โดยการป้อนไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้ผ่านแบบจำลอง Selective Noncatalytic Reduction (SNCR)

ในการจำลองการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ จะพิจารณาปรากฏการณ์ถ่ายโอนความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ (NO) และถ้าหากมีไนโตรเจนออกไซด์ภายในเชื้อเพลิง จะพิจารณาปรากฏการณ์ถ่ายโอนความเข้มข้นของไฮโดรไซยาไนด์ (HCN) และแอมโมเนีย (NH₃) เพิ่มเติม เมื่อมีการจำลองวิถีผ่านทางไนตรัสออกไซด์ สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์ จะถูกนำมาคำนวณร่วมด้วย ทั้งนี้ปรากฏการณ์ถ่ายโอนมวลสารจะถูกพิจารณาในแง่อัตราการไหลและปฏิกิริยาเผาไหม้

เพื่อที่จะจำลองการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ Ansys FLUENT จำเป็นต้องแก้สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ (NO) และถ้าหากมีไนโตรเจนออกไซด์ภายในเชื้อเพลิง ANSYS Fluent ก็จะแก้สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนความเข้มข้นเพิ่มเติม โดยจะเพิ่มไฮโดรไซยาไนด์ (HCN) และแอมโมเนีย (NH₃) และเมื่อมีการจำลองวิถีผ่านทางไนตรัสออกไซด์ สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์ก็จะถูกนำมาคำนวณร่วมด้วย สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนจะถูกแก้หาคำตอบจากพื้นฐานของอัตราการไหลและปฏิกิริยาเผาไหม้ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือไนโตรเจนออกไซด์จะถูกคำนวณหลังจากการคำนวณปฏิกิริยาเผาไหม้ ซึ่งการจำลองกระบวนการเผาไหม้ที่แม่นยำก็จะนำไปสู่การทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่ถูกต้องด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างกรณีการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านวิถีอุณหภูมิ ปริมาณจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุกๆ 90 K ที่เพิ่มขึ้นหลังจากอุณหภูมิของเปลวเพลิงสูงกว่า 2200 K การป้อนค่าต่างๆจำเป็นต้องฝึกฝนอย่างดี

เพื่อที่ป้อนค่าข้อมูลทางกายภาพที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและเงื่อนไขขอบเขตที่แม่นยำ สำหรับแบบจำลอง การเผาไหม้ การตั้งค่าความปั่นป่วน สมการเคมี การแผ่รังสี และแบบจำลองย่อยอื่น จะต้องพิจารณา ใส่ข้อมูลอย่างเหมาะสม

3.2.2 การเกิดและการลดลงของไนโตรเจนออกไซด์ในเปลวเพลิง

หากพิจารณาเปลวเพลิงแบบราบเรียบในระดับโมเลกุล ที่อยู่ภายในเปลวเพลิงแบบปั่นป่วน การเกิดไนโตรเจนออกไซด์สามารถจำแนกได้เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยา 4 ประเภท คือการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ (thermal NO_x formation) การเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว (prompt NO_x formation) การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิง (fuel NO_x formation) และการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านทางไนตรัสออกไซด์ (N₂O intermediate) ตามลำดับ การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ เกิดจากปฏิกิริยาสันดาปของไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ การเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วจะเกิดมาจากปฏิกิริยาที่รวดเร็วบริเวณขอบของเปลวเพลิง และการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงจากการสันดาปของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิง ที่ความดันสูงและสภาวะที่มีออกซิเจนหนาแน่น ไนโตรเจนออกไซด์อาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลไนโตรเจนผ่านทางไนตรัสออกไซด์ได้ การเผาไหม้ซ้ำ (reburning) ในกลไกของ SNCR จะลดปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์โดยรวม โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจน กับไฮโดรคาร์บอน และแอมโมเนียตามลำดับ

3.2.3 สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนของไนโตรเจนออกไซด์

Ansys FLUENT จะแก้สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนของไนโตรเจนออกไซด์ โดยคำนวณสมการการพา สมการการแพร่ การเกิดและการใช้ไปของไนโตรเจนออกไซด์และโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง แนวทางนี้ใช้หลักการพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวลสาร ผลกระทบจาก Residence Time ในกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์โดยใช้หลักการอ้างอิงกรอบของ Lagrangian ได้ถูกนำมาคำนวณผ่านทางสมการการพาในสมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนอ้างอิงกรอบของ Eulerian สำหรับกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิและปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว จะใช้เพียงสมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนของไนโตรเจนออกไซด์ตามสมการที่ (3.1) เพียงสมการเดียว ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{NO}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{NO}}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{NO}}) + S_{\text{NO}} \quad (3.1)$$

การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงจำเป็นต้องพิจารณาปรากฏการณ์ถ่ายโอนของไนตรัสออกไซด์ (N_2O) มาเพิ่มเติม ตามสมการที่ (3.2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{N_2O}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{N_2O}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{N_2O}) + S_{N_2O} \quad (3.2)$$

โดยที่ Y_{N_2O} และ Y_{NO} คือสัดส่วนเชิงมวลของ N_2O และ NO ในสถานะก๊าซ ค่า D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ ส่วนค่าตั้งต้นของสมการปรากฏการณ์ถ่ายโอน S_{N_2O} และ S_{NO} ซึ่งจะให้คำนิยามในแต่ละประเภทกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

3.2.4 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ (Thermal NO)

การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ สามารถพิจารณาได้จากชุดของปฏิกิริยาเคมีที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามกลไกของ Zeldovich สมการหลักของการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิมีดังต่อไปนี้



ส่วนสมการที่ (3.5) ก็มีผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะที่ใกล้เคียงสัดส่วนผสมพอดี (near-stoichiometric conditions) และในส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงหนาแน่น (fuel-rich mixture)



3.2.4.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดภายในห้องเผาไหม้ได้ถูกรวบรวมจากผลการทดลองและการศึกษาจำนวนมาก และข้อมูลที่ได้จากการศึกษาได้ผ่านการประเมินผลความถูกต้องอย่างเข้มงวด รายละเอียดสัมประสิทธิ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสมการถูกเลือกใช้จากการผลการประเมินความแม่นยำในงานวิจัยของ Hanson and Salimian [12] ซึ่งถูกใช้ในการจำลองไนโตรเจนออกไซด์ ดังนี้

$$k_{f,1} = 1.8 \times 10^8 e^{-38370/T} \quad k_{r,1} = 3.8 \times 10^7 e^{-425/T}$$

$$k_{f,2} = 1.8 \times 10^4 e^{-4680/T} \quad k_{r,2} = 3.81 \times 10^3 e^{-20820/T}$$

$$k_{f,3} = 7.1 \times 10^7 e^{-450/T} \quad k_{r,3} = 1.7 \times 10^8 e^{-24560/T}$$

โดยที่ $k_{f,1}$, $k_{f,2}$ และ $k_{f,3}$ เป็นค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า และ $k_{r,1}$, $k_{r,2}$ และ $k_{r,3}$ เป็นของปฏิกิริยาย้อนกลับ หน่วยของค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ $\text{m}^3/\text{gmol}\cdot\text{s}$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาลัพธ์ของการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านทางปฏิกิริยาสามารถสรุปได้ ตามสมการที่ (3.6) ดังนี้

$$d[\text{NO}]/dt = k_{f,1}[\text{O}][\text{N}_2] + k_{f,2}[\text{N}][\text{O}_2] + k_{f,3}[\text{N}][\text{OH}] - k_{r,1}[\text{NO}][\text{N}] - k_{r,2}[\text{NO}][\text{O}] - k_{r,3}[\text{NO}][\text{H}] \quad (3.6)$$

โดยมีความเข้มข้นของสารมีหน่วยเป็น gmol/m^3 และเพื่อที่จะคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ NO และ N จำเป็นต้องทราบความเข้มข้นของ O, H และ OH

3.2.4.2 สมมุติฐานกึ่งสมดุลเวลาของความเข้มข้นของไนโตรเจน (the quasi-steady assumption for [N])

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนโตรเจนออกไซด์จะมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 1800 K โดยประมาณ เนื่องจากความแข็งแรงของไนโตรเจนพันธะสามซึ่งจะต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะมากถึง 941 kJ/gmol) ผลกระทบเช่นนี้ถูกนำเสนอในรูปแบบของพลังงานกระตุ้นที่สูงในสมการ ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่เป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกลไก Zeldovich ที่ปรับปรุงแล้ว อย่างไรก็ตาม อดีพลังงานกระตุ้นของการสันดาปอะตอมของไนโตรเจนอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ และเมื่อมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ ในสภาวะเปลวเพลิงที่มีเชื้อเพลิงบาง อัตราการใช้ไปของอะตอมของไนโตรเจนก็จะเท่ากับอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และสามารถตั้งสมมุติฐานกึ่งสมดุลเวลาได้ สมมุติฐานเช่นนี้จะใช้ได้ ในกรณีของการเผาไหม้โดยทั่วไปยกเว้นกรณีที่การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงหนาแน่นยิ่งยวดเท่านั้น เพราะฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์มีค่าเท่ากับสมการที่ (3.7)

$$d[\text{NO}]/dt = \frac{2 k_{f,1}[\text{O}][\text{N}_2](1 - (k_{r,1} k_{r,2}[\text{NO}]^2) / (k_{f,1}[\text{N}_2] k_{f,2}[\text{O}_2]))}{(1 + (k_{r,1}[\text{NO}]/k_{f,2}[\text{O}_2] + k_{f,3}[\text{OH}]))} \quad (3.7)$$

จากสมมุติฐานนี้ ทำให้เหลือเฉพาะ [O] และ [OH] เท่านั้นในการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ NO และ N ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.7-1) ถึง (3.7-3)

3.2.4.3 ความไวต่ออุณหภูมิของไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาถึงสมการที่ (3.7) อัตราการเกิดไนตริกออกไซด์จะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผาไหม้อย่างยิ่ง แต่ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง จริงแล้วตามขั้นตอนที่เป็นจำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา ตามจริงแล้วขั้นตอนที่จำกัดจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา $k_{f,1}$ โดยอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวทุก 90K ที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเผาไหม้ที่สูงกว่า 2200 K

3.2.4.4 การคำนวณไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิแยกออกมาจากกระบวนการเผาไหม้

เพื่อที่จะแก้สมการ (3.7) จำเป็นต้องทราบความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจน [O] และความเข้มข้นอนุมูลอิสระไฮดรอกไซด์ [OH] นอกเหนือจากความเข้มข้นของสารที่เสถียรแล้วเช่นออกซิเจนและไนโตรเจน ตามคำแนะนำในงานวิจัยของ Zeldovich กลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์สามารถพิจารณาแยกออกจากกระบวนการเผาไหม้หลักโดยสมมุติค่าสมดุลของอุณหภูมิ สมดุลของสารที่เสถียรและ สมดุลของอะตอมออกซิเจน และอนุมูลอิสระไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะตอมของออกซิเจนจะมีความเข้มข้นมากกว่าระดับสมดุลของตัวมันมาก ผลกระทบจากสมดุลบางส่วนของอะตอมออกซิเจนที่กระทบต่ออัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ได้ถูกศึกษาในงานวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้ของอากาศและมีเทนแบบราบเรียบ ผลของการศึกษาพบว่าระดับของมลภาวะจากไนโตรเจนออกไซด์ จะน้อยกว่ากรณีสมดุลบางส่วนประมาณ 28% ในบริเวณเปลวเพลิง หากเราสมมุติโดยใช้ความเข้มข้นของอะตอมไนโตรเจนที่สมดุล

3.2.4.5 วิธีการหาความเข้มข้นของอนุมูลอิสระของออกซิเจน

งานวิจัยให้ข้อมูลเพียงเล็กน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับความเข้มข้นของอนุมูลอิสระในเปลวเพลิงปั่นป่วนที่ประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม แต่งานดังกล่าวก็แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์นี้มีอยู่จริงในเปลวเพลิง ในปัจจุบันยังไม่มีนิยามข้อสรุปที่ชัดเจนของผลกระทบจากการใช้สมดุลบางส่วนต่ออัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ในเปลวเพลิงแบบปั่นป่วนและก็มีข้อเสนอแนะว่าอนุมูลอิสระที่สมดุลบางส่วนจะกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิเกิน 25% และพลศาสตร์ของไหลเป็นตัว

หลักที่กระทบต่ออัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ในกรณีของเปลวเพลิงแบบปั่นป่วน การเพิ่มขึ้นของอนุภาคนิวเคลียสมากเกินไป จะกระทบต่ออัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างมาก

เพื่อควบคุมความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นได้นี้ วิธีการหนึ่งก็นำกลไกของ Zeldovich เข้าไปคำนวณร่วมกับกลไกการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอนโดยละเอียดซึ่งมีปฏิกิริยา ชนิดของสาร และขั้นตอนจำนวนมาก วิธีการในลักษณะได้เคยใช้ในงานวิจัยมาแล้ว แต่เนื่องจากการใช้ระยะเวลาในการคำนวณมากจนไม่คุ้มค่าที่ใช้วิธีนี้ในทางเศรษฐศาสตร์

เพื่อที่จะคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคนิวเคลียสของออกซิเจน Ansys FLUENT จะเลือกใช้ 1 ใน 3 วิธีการ โดยสมมุติว่าสมดุล (equilibrium approach) สมดุลบางส่วน (partial equilibrium approach) และความเข้มข้นจากการทำนาย (predicted concentration approach) ในการตระหนักถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนข้างต้น โดยสามารถเลือกใช้ดังนี้ [13]

วิธีการที่ 1 พิจารณาความเข้มข้นอะตอมของออกซิเจนในสภาวะสมดุล

$$[O] = 3.97 \times 10^5 T^{-1/2} [O_2]^{1/2} e^{-31090/T} \text{ gmol/m}^3 \quad (3.7-1)$$

วิธีการที่ 2 พิจารณาความเข้มข้นอะตอมของออกซิเจนในสภาวะสมดุลบางส่วน

$$[O] = 36.64 T^{1/2} [O_2]^{1/2} e^{-27123/T} \text{ gmol/m}^3 \quad (3.7-2)$$

วิธีการที่ 3 พิจารณาความเข้มข้นอะตอมของออกซิเจนจากการทำนาย

เป็นวิธีการคำนวณเมื่อใช้แบบจำลองทางเคมีขั้นสูง เช่นแบบจำลอง Flametet

3.2.4.6 วิธีการหาความเข้มข้นของอนุภาคนิวเคลียสของไฮดรอกไซด์

เช่นเดียวกันกับกรณีของอนุภาคนิวเคลียสออกซิเจน ANSYS Fluent จะใช้ 3 วิธีการเพื่อที่จะหาความเข้มข้นของอนุภาคนิวเคลียสไฮดรอกไซด์ ในการคำนวณไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ

วิธีการที่ 1 พิจารณาตัดการนำความเข้มข้นอนุภาคนิวเคลียสไฮดรอกไซด์ไปคำนวณ

เป็นวิธีการที่สมมุติให้ตัดสมการ (3.5) ออกจากการคำนวณในสมการที่ (3.7) ซึ่งสามารถใช้ได้ในกรณีเชื้อเพลิงเจือจาง

วิธีการที่ 2 พิจารณาความเข้มข้นของอนุภาคนิวเคลียสไฮดรอกไซด์ในสภาวะสมดุลบางส่วน [14]

$$[\text{OH}] = 2.129 \times 10^2 T^{-0.57} e^{-4595/T} [\text{O}]^{1/2} [\text{H}_2\text{O}]^{1/2} \text{ gmol/m}^3 \quad (3.7-3)$$

วิธีการที่ 3 พิจารณาความเข้มข้นอนุมูลอิสระไฮดรอกไซด์จากการทำนาย เป็นวิธีการคำนวณเมื่อใช้แบบจำลองทางเคมีขั้นสูง เช่นแบบจำลอง Flametet

3.2.4.7 สรุปการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิต่ำ

เพื่อที่จะสรุปการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิต่ำ อัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์สามารถทำนายได้จากสมการ ความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นในการคำนวณ โดยใช้สมมุติฐานว่าอยู่ในสภาวะสมดุล สภาวะสมดุลบางส่วน หรือใช้สัดส่วนเชิงมวลของอะตอมออกซิเจนเฉพาะจุด เราสามารถเลือกได้ว่าจะใช้วิธีการไหนระหว่างตั้งค่าปัญหา หากพิจารณาสมการที่ (3.8) ในรูปแบบปรากฏการณ์ถ่ายโอน พจน์แหล่งกำเนิดของไนโตริกออกไซด์จากกลไกการไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิต่ำคือ

$$S_{\text{thermal,NO}} = M_{w,\text{NO}} d[\text{NO}]/dt \quad (3.8)$$

โดยที่ $M_{w,\text{NO}}$ คือน้ำหนักของโมเลกุลของไนโตริกออกไซด์ และ $d[\text{NO}]/dt$ สามารถคำนวณได้จากสมการ

3.2.5 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว (Prompt NO)

โดยทั่วไปปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนกับอากาศ จะสูงกว่าที่คำนวณได้จากกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากยังมีกลไกประเภทอื่นที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์วิธีอื่นๆได้อีก เช่นวิธีไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

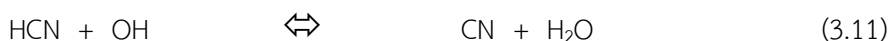
3.2.5.1 สิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว

การค้นพบของกลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์รูปแบบที่ 2 ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Fenimore และได้ให้ความจำกัดความว่าไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วเอาไว้ (prompt NOx) ในบางสภาวะของการเผาไหม้ จะพบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วมีนัยสำคัญมากพอที่จะนำมาพิจารณา ตัวอย่างของสภาวะดังกล่าวเช่นอุณหภูมิต่ำ สภาวะที่มีเชื้อเพลิงหนาแน่น และ

บริเวณที่มีระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาสั้น สำหรับตัวอย่างของบริเวณที่มีสภาวะเช่นนั้นคือ บริเวณผิวของหัวฉีดเชื้อเพลิง ระบบห้องเผาไหม้แยกส่วน และการเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ในปัจจุบันเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว เทียบกับการเกิดไนโตรเจนออกไซด์สุทธิแล้ว ยังมีสัดส่วนที่น้อยสำหรับห้องเผาไหม้โดยทั่วไป อย่างไรก็ตามการออกแบบสมัยใหม่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ลงมาต่ำมากโดยพัฒนาวิธีการออกแบบรูปร่างของห้องเผาไหม้ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วกลับมามีความสำคัญมากขึ้น

3.2.5.2 กลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว

ตามที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้การเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วจะพบเป็นส่วนมากในบริเวณที่มีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสูง กลไกการเกิดที่แท้จริงเกี่ยวข้องกับอนุกรมที่ซับซ้อนของชุดปฏิกิริยาเคมี และมีสารชั้นกลางจำนวนมากต้องพิจารณา เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นที่ยอมรับตามสมการที่ (3.9) – (3.14)



ไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วส่วนหนึ่งเกิดมาจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงบางชนิด เช่น CH, CH₂, C, C₂H ในเปลวเพลิงของการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งส่วนมากก็คือมาจาก CH และ CH₂ ผ่านทาง



ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเหล่านี้ไปสู่การเกิดอะมีนและสารประกอบไคโน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นไนตริกออกไซด์ได้คล้ายกับการเกิดการสันดาปของเชื้อเพลิงไนโตรเจน ตัวอย่างเช่น



3.2.5.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว

การเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วเป็นส่วนสำคัญโดยตรงกับจำนวนอะตอมของคาร์บอนต่อหน่วยปริมาตรและยังไม่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสารไฮโดรคาร์บอนตั้งต้น จำนวนของไฮโดรไฮยาไนต์ที่ขึ้นเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน จะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนสมดุลเคมี เมื่อมีอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่เพิ่มขึ้น ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วก็จะเพิ่มขึ้นในตอนแรก แล้วผ่านจุดสูงสุด แล้วในที่สุดก็ลดลงจากผลปริมาณออกซิเจนในอากาศที่เข้ามาผสม

3.2.5.4 ปฏิกริยาหลัก

ปฏิกริยาในสมการที่ (3.9) คือปฏิกริยาหลัก ในการศึกษาเร็วๆนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการแจกแจงความหนาแน่นทางสถิติสำหรับตำแหน่งของที่มีค่าไนโตรเจนออกไซด์สูงที่สุดจะเข้าใกล้ตรงกับบริเวณที่มี ปริมาณ CH สูงที่สุด ซึ่งทำให้สังเกตได้ว่าบริเวณที่มีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์หนาแน่นสูงก็คือบริเวณฐานของเปลวเพลิง เป็นกลไกการไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วซึ่งเกิดมาจากปฏิกริยาของ CH ทำให้สามารถประมาณได้ว่าอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วคือ

$$d[\text{NO}]/dt = k_0[\text{CH}][\text{N}_2] \quad (3.15)$$

3.2.5.5 กลยุทธ์ในการสร้างแบบจำลอง

เนื่องจากยังคงมีความไม่แน่นอนในประเด็นเรื่องข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการปฏิกริยาในสมการข้างต้น จากปฏิกริยาที่ (3.9) – (3.13) สามารถสรุปได้ว่าการทำนายปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วภายในเชื้อเพลิงยังคงจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับกลไกการเผาไหม้ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งกลไกดังกล่าวมีขั้นตอนจำนวนมาก ตามที่ได้เคยบรรยายมาก่อนหน้านี้ว่า ค่าใช้จ่ายในการคำนวณที่ซับซ้อนสูงเกินกว่าความคุ้มค่า แบบจำลองไนโตรเจนออกไซด์ในปัจจุบัน ค่าที่เกี่ยวกับจลศาสตร์แบบอย่างง่ายถูกค้นพบโดย De Soete [15] โดยที่ De Soete ใช้วิธีการนำค่าที่ได้จากผลการทดลองของอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์สุทธิ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณอย่างง่ายของทั้งอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และอัตราการเกิดไนโตรเจน เขาชี้ให้เห็นว่าอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วสามารถทำนายได้จาก

$$d[\text{NO}]/dt = (\text{overall prompt NO}_x \text{ formation rate})$$

$$- \text{ (overall prompt } N_2 \text{ formation rate) } \quad (3.16)$$

หากพิจารณาในช่วงต้นของเปลวเพลิง เป็นบริเวณที่ไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วเกิดขึ้น มาตามสถานะเชื้อเพลิงหนา ในขณะที่ความเข้มข้นของอะตอมออกซิเจน และอนุมูลอิสระ ไนโตรเจนเกือบทั้งหมดจะกลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์มากกว่าก๊าซไนโตรเจน เพราะฉะนั้น อัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วสามารถที่จะประมาณได้ดังนี้

$$d[NO]/dt = k_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-E_a/RT} \quad (3.17)$$

สำหรับเปลวเพลิงของส่วนผสมเอททิลีน (C₂H₄) และอากาศ มีค่าคงที่ [15]

$$k_{pr} = 1.2 \times 10^7 (RT/p)^{a+1} ; E_a = 251151 \text{ J/gmol}$$

โดยที่ a คือลำดับชั้นปฏิกิริยาของออกซิเจน (oxygen reaction order), R คือค่าคงที่ก๊าซ และ p คือความดัน (ทุกค่าอยู่ในหน่วยเอสไอ) อัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วเป็นปฏิกิริยาลำดับชั้นที่ 1 ต่อความเข้มข้นของไนโตรเจนและเชื้อเพลิง แต่ในกรณีของออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ได้จากการทดลอง

3.2.5.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน

ตามสมการที่ (3.17) ถูกทำการทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองโดย Backmier และคณะ ในกรณีหลายๆความเข้มข้น และชนิดเชื้อเพลิงหลายชนิด ผลจากการใช้แบบจำลองดังกล่าวทำนาย จะมีความแม่นยำน้อยลงเรื่อยๆ ถ้าหากเชื้อเพลิงหนามากขึ้น เพื่อที่จะลดความคลาดเคลื่อนลักษณะนี้ และเพิ่มความสามารถให้ทำนายไนโตรเจนออกไซด์ได้ทุกสภาวะแบบจำลองของ De Soete ได้ถูกปรับปรุงโดยเปรียบเทียบจากผลการทดลอง และเพิ่ม correction factor (f) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ผลกระทบจากชนิดของเชื้อเพลิง จำนวนอะตอมของคาร์บอน และอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง สมการ กลายเป็น

$$d[NO]/dt = f k_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-E_a/RT} \quad (3.18)$$

จนกระทั่งได้พจน์แหล่งกำเนิดในกรณีของกลไกไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วคือ

$$S_{\text{thermal,NO}} = M_{w,NO} d[NO]/dt \quad (3.19)$$

สำหรับสมการด้านบน [15]

$$f = 4.75 + 0.0819 n - 23.2\phi + 32\phi^2 - 12.2 \phi^3 \quad (3.20)$$

$$k'_{pr} = 6.4 \times 10^6 (RT / p)^{a+1}$$

$$E'_a = 303474.125 \text{ J / gmol}$$

โดยที่ n คือจำนวนอะตอมของคาร์บอนต่อโมเลกุลของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน และ ϕ คืออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเทียบกับอัตราส่วนในทางทฤษฎี correction factor ได้มาจากการเทียบกับผลการทดลอง โดยสามารถใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่เป็นอลิฟาติกอัลเคน (C_nH_{2n+2}) ในช่วงอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 0.6 ถึง 1.6 ในกรณีที่อยู่นอกค่าเหล่านี้ ควรพิจารณาขีดจำกัดที่เหมาะสม ค่า k'_{pr} และ E'_a ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยภาควิชาเชื้อเพลิงและพลังงาน มหาวิทยาลัย Leeds ประเทศอังกฤษ ในกรณีที่ห้องเผาไหม้มีรูปร่างที่ซับซ้อน จะทำให้อัตราส่วนผสมจากการคำนวณจะมีความไม่แน่นอนสูง ซึ่งจะทำให้การทำนายไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วไม่แม่นยำ อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับปริมาณไนโตรเจนออกไซด์สุทธิแล้วไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็วปกติก็จะมีปริมาณน้อย ดังนั้นผลลัพธ์โดยรวมจากการทำนายก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.2.5.7 ลำดับปฏิกิริยาของออกซิเจน

ลำดับปฏิกิริยาของออกซิเจน (a) ขึ้นอยู่กับสถานะของเปลวเพลิง ตามสมการของ De Soete แล้วค่าลำดับของปฏิกิริยาจะสัมพันธ์กับสัดส่วนโมลของออกซิเจนในเปลวเพลิงดังนี้ [15]

$$a = 1.0 \quad \text{เมื่อ } X_{O_2} < 4.1 \times 10^{-3}$$

$$a = -3.95 - 0.9 \ln X_{O_2} \quad \text{เมื่อ } 4.1 \times 10^{-3} < X_{O_2} < 1.11 \times 10^{-2}$$

$$a = -0.35 - 0.1 \ln X_{O_2} \quad \text{เมื่อ } 1.1 \times 10^{-2} < X_{O_2} < 0.03$$

$$a = 0 \quad \text{เมื่อ } X_{O_2} > 0.03$$

3.2.6 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิง (fuel NO)

ในเชื้อเพลิงบางชนิดเช่นจะมีสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของไนโตรเจน ทั้งในรูปแบบของของเหลวและของแข็ง เชื้อเพลิงจากฟอสซิลสามารถก่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์จากการไหม้ได้ เช่นเดียวกัน ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแบบเชื้อเพลิงจะมีผลกระทบอย่างยิ่งในภาคน้ำมันเชื้อเพลิงจากโรง

กลิ่น หรือจากถ่านหิน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจนประมาณ 0.3 – 2% โดยมวล แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ คือก๊าซธรรมชาติ จึงไม่มีนัยสำคัญที่จะศึกษาพิจารณาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิง

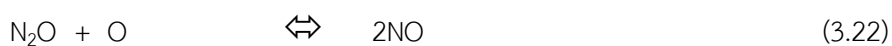
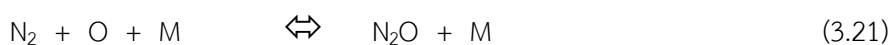
3.2.7 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านสารชั้นกลางไนตรัสออกไซด์ (N₂O intermediate)

ไนโตรเจนออกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้จากโมเลกุลของไนโตรเจนผ่านทางไนตรัสออกไซด์ ไนโตรเจนเข้ากระบวนการเผาไหม้เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ หากพิจารณาภายใต้สภาวะที่มีความดันและความเข้มข้นของออกซิเจนสูง แล้วกลไกผ่านตัวกลางไนตรัสออกไซด์ ในสภาวะดังกล่าวสามารถคิดเป็นสัดส่วนมากถึง 90% ของไนโตรเจนออกไซด์ในกระบวนการเผาไหม้ กลไกนี้จะเกิดขึ้นมากในเครื่องยนต์กังหันก๊าซและเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยอาศัยความดัน ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ เครื่องยนต์กลุ่มนี้จะถูกออกแบบให้ทำงานที่อุณหภูมิมากขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านสารตัวกลางจึงมีนัยสำคัญมากขึ้น โดยจะมีมากถึงประมาณ 30% ของปริมาณไนโตรเจนออกไซด์สุทธิ

กลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านสารตัวกลางไนตรัสออกไซด์ ยังมีความสำคัญสำหรับระบบที่ทำงานแบบไร้เปลวเพลิง (flameless mode) ในการทำงานแบบไร้เปลวเพลิงเชื้อเพลิงและออกซิเจน จะถูกเจือจางโดยก๊าซเฉื่อยจำนวนมากจนกระทั่งความร้อนจะกระบวนการเผาไหม้ถูกดูดซับจนเกือบหมด เป็นผลทำให้ไม่เกิดบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง เป็นการป้องกันการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ ในงานวิจัยพบว่ากลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านสารตัวกลางไนตรัสออกไซด์อาจจะมีสัดส่วนมากถึง 90% ในการเผาไหม้แบบไร้เปลวเพลิง ในส่วนที่เหลือก็จะเกิดจากกลไกไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว

3.2.7.1 กลไกของไนโตรเจนออกไซด์ผ่านทางสารชั้นกลางไนตรัสออกไซด์

รูปแบบที่ง่ายที่สุด สามารถสรุปได้เป็น 2 ปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนี้



โดยที่ M คือสารที่สามทั่วไป เนื่องจากสมการแรกเกี่ยวข้องกับสารที่สาม และกลไกก็ต้องการความดันที่สูง ทั้งสองปฏิกิริยามีอนุโมลอิสระมาเกี่ยวข้อง ซึ่งหมายความว่ากลไกต้องการสภาวะออกซิเจนหนาแน่น การเกิดอนุโมลอิสระออกซิเจนปกติจะสมมุติว่าเกิดจากการแตกตัวของก๊าซออกซิเจน



ตามกฎของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของไนโตรเจนออกไซด์ผ่านทางสารชั้นกลางไนตรัสออกไซด์คือ

$$d[NO]/dt = 2(k_{f,2}[N_2O][O] - k_{r,2}[NO]^2) \quad \text{gmol/m}^3\text{-s} \quad (3.24)$$

เพื่อที่จะแก้สมการ (3.24) เราจำเป็นต้องทราบความเข้มข้นของอนุโมลอิสระออกซิเจนและไนตรัสออกไซด์ โดยการหาความเข้มข้นจะต้องพิจารณาไนตรัสออกไซด์อยู่ในสภาวะกึ่งคงตัว หรือ $d[N_2O]/dt = 0$ จัดรูปสมการหาความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์ได้ดังนี้

$$[N_2O] = (k_{f,1}[N_2][O][M] + k_{r,2}[NO]^2)/(k_{r,1}[M] + k_{f,2}[O]) \quad (3.25)$$

ถ้าทำการแก้สมการ (3.25) จะได้อัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์เมื่อความเข้มข้นของไนโตรเจน ออกซิเจน และสารที่สาม [16]

$$\begin{aligned} k_{f,1} &= 4.44 \times 10^{32} T^{-8.358} e^{-28234/T} & k_{r,1} &= 4.00 \times 10^8 e^{-28234/T} \\ k_{f,2} &= 2.90 \times 10^7 e^{-11651/T} & k_{r,2} &= 1.45 \times 10^{-29} T^{9.259} e^{-11651/T} \end{aligned}$$

โดยที่ $k_{f,1}$ และ $k_{f,2}$ เป็นค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้า $k_{r,1}$ และ $k_{r,2}$ เป็นค่าคงที่ปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่วนหน่วยของ $k_{f,2}$ $k_{r,1}$ $k_{r,2}$ คือ $\text{m}^3/\text{gmol}\cdot\text{s}$ ในขณะที่หน่วยของ $k_{f,1}$ เป็น $\text{m}^6/\text{gmol}^2\cdot\text{s}$

3.3 การจำลองปฏิกิริยาสันดาปในห้องเผาไหม้

3.3.1 ทฤษฎีสัดส่วนของผสม

คำนิยามของสัดส่วนของผสม (mixture fraction), f เป็นค่าเชิงปริมาณซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ (3.26)

$$f = (Z_i - Z_{i,ox}) / (Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}) \quad (3.26)$$

โดย Z_i คือสัดส่วนเชิงมวลของธาตุ i และ subscript ox หมายถึงค่าบริเวณสายป้อนเข้าของ Oxidizer และ subscript $fuel$ หมายถึงค่าบริเวณสายป้อนเข้าของเชื้อเพลิง ถ้าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารทุกชนิดมีค่าเท่ากัน สมการที่ (3.26) ของสารแต่ละชนิดก็จะมีค่าเฉพาะ ผลรวมของสัดส่วนของผสมของทุกสายป้อนจะมีค่าเท่ากับ 1

3.3.2 สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนของสัดส่วนของผสม

สมการปรากฏการณ์ถ่ายโอนของเชื้อเพลิง ภายใต้สมมติฐานการแพร่กระจายแบบสมดุลง (ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารทุกชนิดมีค่าเท่ากัน) สมการของแต่ละองค์ประกอบในเชื้อเพลิงสามารถยุบรวมกันเหลือสมการเดียวซึ่งสัดส่วนเชื้อเพลิง (mixture fraction) ถูกนิยามให้เป็น f ดังนั้น f เป็นปริมาณที่ถูกอนุรักษ์ สมการค่าเฉลี่ย Favre (ใช้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย) ของสัดส่วนเชื้อเพลิง ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) \quad (3.27)$$

การแก้ปัญหาค่าเฉลี่ย Favre ของสัดส่วนเชื้อเพลิง จะคำนวณด้วยสมการอนุรักษ์สำหรับค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชื้อเพลิง f'^2

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \overline{v f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + c_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - c_d \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (3.28)$$

โดยที่ $f' = f - \bar{f}$ ค่าแนะนำของค่าคงที่ σ_t , c_g และ c_d คือ 0.85, 2.86 และ 2.0 ตามลำดับ [17]

บทที่ 4

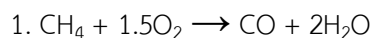
แบบจำลอง

ในการพัฒนาแบบจำลองไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมจำลองทางวิศวกรรม 2 ชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย Aspen HYSYS และ Ansys FLUENT เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลจากโรงงานจริง โปรแกรม HYSYS จะถูกใช้ในการคำนวณด้านอุณหพลศาสตร์ของแต่ละหน่วยปฏิบัติการเพื่อที่จะคำนวณค่าต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเงื่อนไขขอบเขตบริเวณโดยรอบของห้องเผาไหม้ โปรแกรม CFD (Ansys FLUENT) จะสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำถ้าหากเงื่อนไขขอบเขตทุกตำแหน่งถูกคำนวณมาอย่างดี และตั้งค่าในโปรแกรมอย่างเหมาะสม ดังนั้นผลจากการคำนวณจากโปรแกรม HYSYS จะถูกนำมาเป็นค่าที่ป้อนให้กับแบบจำลอง FLUENT

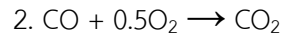
4.1 การพัฒนาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

เริ่มจากการเปิดโปรแกรม HYSYS และเพิ่มองค์ประกอบเกี่ยวกับการเผาไหม้ซึ่งประกอบไปด้วยเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ มีเทน (CH_4) อีเทน (C_2H_6) โพรเพน (C_3H_8) และอากาศ (O_2 และ N_2) และผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) และมลภาวะทางอากาศที่งานวิจัยนี้สนใจคือไนตริกออกไซด์ (NO) โดยการเลือกใช้ชุดของไหลของ Peng Robinson ซึ่งใช้งานได้ดีกับไฮโดรคาร์บอนโดยทั่วไป สำหรับแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง มีความซับซ้อนอย่างมาก และมีอนุโมลอิสระเป็นสารชั้นกลางที่ยากต่อการหาคุณสมบัติที่รายละเอียดและความถูกต้องมากพอ ที่จะนำมาใช้ในการจำลองกระบวนการเผาไหม้ด้วยโปรแกรม HYSYS จึงจำเป็นต้องใช้กลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม ตามที่ศึกษาจากงานวิจัยต่างๆพบว่ามี

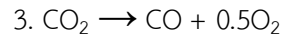
กลไกการเผาไหม้โดยรวมแบบ 5 ขั้นตอน โดย Nicol [18] สำหรับปฏิกิริยาสันดาปมีเทนและการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งถูกปรับแต่งให้ใช้ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงบางแบบผสมก่อน (lean-premixed combustion) โดยกลไกนี้สามารถใช้งานได้ดีที่ความดันบรรยากาศ และที่อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 650K และมีอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงต่ออากาศอยู่ในช่วง 0.45 ถึง 0.70 หน่วยที่ใช้ในสมการด้านล่างคือ kmol, m³, s และ K



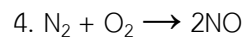
$$R_1 = 10^{15.22} [\text{CH}_4]^{1.46} [\text{O}_2]^{0.5217} \exp(-20643/T)$$



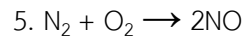
$$R_2 = 10^{14.902} [\text{CO}]^{1.6904} [\text{O}_2]^{1.57} \exp(-11613/T)$$



$$R_3 = 10^{14.349} [\text{CO}_2] \exp(-62281/T)$$



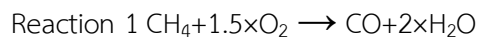
$$R_4 = 10^{23.946} [\text{CO}]^{0.7211} [\text{O}_2]^{4.0111} \exp(53369/T)$$



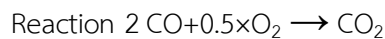
$$R_5 = 10^{14.967} T^{-0.5} [\text{N}_2] [\text{O}_2]^{0.5} \exp(-68899/T)$$

ในกรณีเชื้อเพลิงหนาที่มีอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงต่ออากาศสูงกว่า 0.7 ปริมาณของไนตริกออกไซด์จะมีค่ามากกว่าจริง เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในห้องเผาไหม้จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งเกินกว่าข้อจำกัดของแบบจำลองกลไกการเผาไหม้โดยรวมแบบ 5 ขั้นตอน ไม่ได้พัฒนาขึ้นมาให้รองรับในกรณีที่มีอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงต่ออากาศสูง

ในช่วงต่อมาได้มีการพัฒนาต่อยอดจากแบบจำลองกลไกการเผาไหม้โดยรวมแบบ 5 ขั้นตอน ให้เป็นแบบจำลองกลไกการเผาไหม้โดยรวมแบบ 8 ขั้นตอน โดย Igor V. [19] ให้สามารถใช้งานในช่วงกว้างมากขึ้น กลไกการเผาไหม้โดยรวมแบบดังกล่าว จะประกอบไปด้วย 8 ปฏิริยาเคมี ในรูปแบบที่มีสาร 7 ชนิด แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ 3 ปฏิริยาแรกเป็นปฏิริยาสันดาปมีเทน และอีก 5 ปฏิริยาหลังเป็นปฏิริยาการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ โดยมีรายละเอียดของปฏิริยาและอัตราการเกิดปฏิริยาเคมีดังนี้

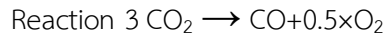


$$R_1 = 10^{13.354 - 0.004628 \times P} [\text{CH}_4]^{1.3 - 0.01148 \times P} [\text{O}_2]^{0.01426} [\text{CO}]^{0.1987} \exp(-(21932 + 269.4 \times P)/T)$$



$$R_2 = 10^{14.338 + 0.1091 \times P} [\text{CO}]^{1.359 - 0.0109 \times P} [\text{H}_2\text{O}]^{0.0912 + 0.0909 \times P} [\text{O}_2]^{0.891 + 0.0127 \times P} \exp(-$$

$$(22398+75.1 \times P)/T)$$



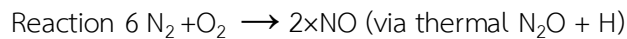
$$R_3 = 10^{15.8144 - 0.07163 \times P} [\text{CO}_2] \times \exp(-(64925.8 - 334.31 \times P)/T)$$



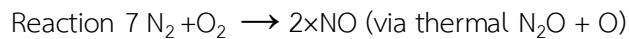
$$R_4 = 10^{14.122 + 0.0376 \times P} [\text{CO}]^{0.8888 - 0.0006 \times P} [\text{O}_2]^{1.1805 + 0.0344 \times P} \exp(-(46748 + 126.6 \times P)/T)$$



$$R_5 = 10^{14.2466 + 0.10779 \times P} [\text{CH}_4]^{2.0886 - 0.03193 \times P} [\text{O}_2]^{-1.6674 + 0.04122 \times P} \exp(-(48772.3 + 789.05 \times P)/T)$$



$$R_6 = 10^{14.592} [\text{N}_2] [\text{H}_2\text{O}]^{0.5} [\text{O}_2]^{0.25} \times T^{-0.7} \exp(-69158/T)$$



$$R_7 = 10^{10.317} [\text{N}_2] [\text{O}_2] \times \exp(-52861/T)$$



$$R_8 = 10^{14.967} [\text{N}_2] [\text{O}_2]^{0.5} T^{-0.5} \times \exp(-68899/T)$$

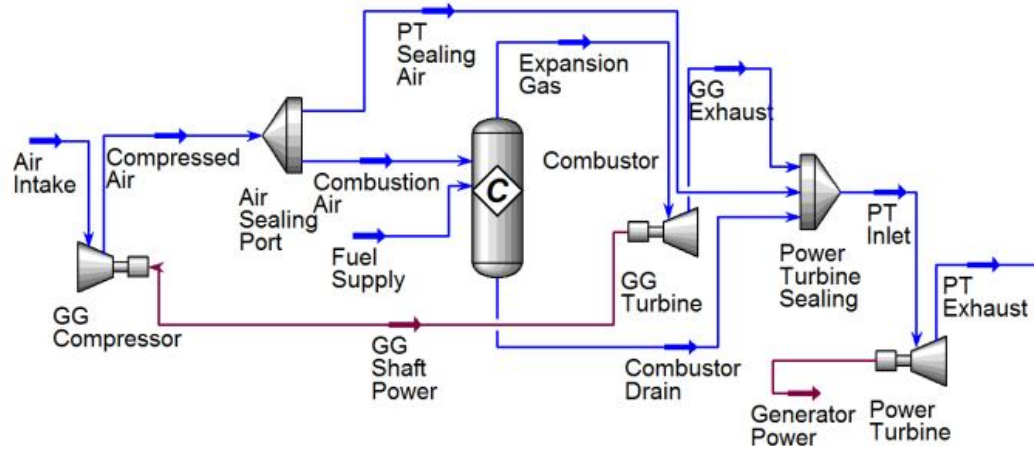
หน่วยต่างๆที่ใช้แสดงในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ พลังงานกัมมันต์เป็น K ความเข้มข้นเป็น kmol/m^3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็น $\text{kmol/m}^3 \text{s}$

แต่เมื่อนำปฏิกิริยาทั้ง 2 ชุด มาทดลองใช้เป็นชุดปฏิกิริยาในโปรแกรม HYSYS พบว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ จะมากพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปไนโตรเจน สลายพันธะสามของก๊าซไนโตรเจน จนทำให้มี Conversion ของปฏิกิริยาดังกล่าวจำนวนมาก เป็นผลทำให้ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์มากเกินกว่าจริงอย่างมาก โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ตามที่บททวนในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 จะใช้วิธีสร้างโครงข่ายของเครื่องปฏิกรณ์จำนวนมาก หรือที่เรียกว่า Chemical Reactor Network (CRN) ในการจำลองห้องเผาไหม้ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น เพื่อให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด การใช้โปรแกรม CFD ในการจำลอง จะเป็นการใช้หลักการเดียวกันกับ CRN แต่จำนวนของเครื่องปฏิกรณ์ในโครงข่ายจะมากกว่าหลายเท่า ยิ่งจำนวนของโครงข่ายปฏิกรณ์มี

มากเท่าไร และสร้างรูปทรงเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ได้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง จะทำให้ผลการคำนวณยิ่งจะใกล้เคียงความจริงมากเท่านั้น แต่ทั้งนี้ก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเช่นกัน

4.2 ขั้นตอนการจำลองเครื่องยนต์กังหันก๊าซด้วย HYSYS

เพื่อที่จะจำลองระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ให้พิจารณาตามขั้นตอนพร้อมกัน Process Flow Diagram ในภาพที่ 4.1 ดังนี้



ภาพที่ 4.1 Process Flow Diagram ที่ใช้ในการจำลองเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

เพื่อให้สามารถเข้าใจขั้นตอนการจำลองเครื่องยนต์กังหันก๊าซด้วย HYSYS ในงานวิจัยนี้ จะจำลองโดยกำหนดสภาวะการเดินเครื่องพื้นฐาน (สภาวะเฉลี่ย) เป็นตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลิตไฟฟ้าด้วยกำลังการผลิต :	90% Load หรือ 9.53 MW
อุณหภูมิของ Air Intake :	30 องศาเซลเซียส
ความดันของ Air Intake :	101.3 kPa
องค์ประกอบ Air Intake :	79.2% ไนโตรเจน โดยโมล 20.8% ออกซิเจน โดยโมล
อุณหภูมิของ Fuel Supply :	28 องศาเซลเซียส
ความดันของ Fuel Supply :	840 kPa
องค์ประกอบของ Fuel Supply :	96.4% มีเทน โดยโมล 0.9% อีเทน โดยโมล 0.1% คาร์บอนไดออกไซด์ โดยโมล 2.6% ไนโตรเจน โดยโมล
อัตราการไหลของ Fuel Supply :	3653585 SCFD

4.2.1. กำหนดสภาวะของเชื้อเพลิงและอากาศ

ระบุค่าที่เกี่ยวข้องในระบบจ่ายเชื้อเพลิงและสภาวะอากาศขาเข้า โดยปกติแล้วเครื่องยนต์จำเป็นต้องทราบค่าต่างๆของเชื้อเพลิงในการคำนวณปริมาณการเปิดลิ้นจ่ายเชื้อเพลิงดังนั้นสภาวะขาเข้าของเชื้อเพลิงสามารถหาค่าได้จากระบบควบคุมของเครื่องยนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงสำหรับคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ค่าความดันและอุณหภูมิของเชื้อเพลิง และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง ในส่วนของสภาวะอากาศ เราจะทราบได้จากอุณหภูมิและความดันบรรยากาศของอากาศขาเข้า มีศัพท์เรียกตามมาตรฐานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซว่า T1 และ P1 ตามลำดับ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการป้อนค่าใน Air Intake Stream (T1 และ P1) และ Fuel Supply Stream ดังนี้

อุณหภูมิของ Air Intake :	30 องศาเซลเซียส
ความดันของ Air Intake :	101.3 kPa
องค์ประกอบ Air Intake :	79.2% ไนโตรเจน โดยโมล 20.8% ออกซิเจน โดยโมล
อุณหภูมิของ Fuel Supply :	28 องศาเซลเซียส
ความดันของ Fuel Supply :	840 kPa
องค์ประกอบของ Fuel Supply :	96.4% มีเทน โดยโมล 0.9% อีเทน โดยโมล 0.1% คาร์บอนไดออกไซด์ โดยโมล 2.6% ไนโตรเจน โดยโมล
อัตราการไหลของ Fuel Supply :	3653585 SCFD

4.2.2. การหาประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ

เนื่องจากเครื่องยนต์จะวัดค่า Compressor Discharge Pressure (CDP หรือ P3) สำหรับใช้ในการควบคุมปริมาณการเปิดลิ้นจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงจะต้องมีความดันมากกว่า CDP เสมอ เพื่อป้องกันการไหลของเปลวเพลิงย้อนกลับเข้าไปในระบบจ่ายเชื้อเพลิง ให้ทดลองกำหนดค่าปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องอัดอากาศ ประมาณ 40 เท่าของอัตราการไหลเชิงมวล

ของเชื้อเพลิงลงในสายขาเข้าของอากาศ และปรับเปลี่ยนค่า Adiabatic Efficiency จนกระทั่ง อุณหภูมิขาออกเครื่องอัดอากาศ (T3) ซึ่งสามารถนำค่าประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ นำไป เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตอนทดสอบเครื่องยนต์จากโรงงาน ว่าใกล้เคียงกับหรือเท่ากับค่าที่วัดได้ จากระบบควบคุมของเครื่องยนต์ โดยปกติแล้วเครื่องอัดอากาศแบบ Axial Flow จะมี Adiabatic Efficiency มากกว่า 75%

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการป้อนค่าความดัน (CDP) ใน Compressed Air Stream และทดลอง กำหนดค่าอัตราการไหลของ Air Intake Stream ดังนี้

ความดันของ Compressed Air :	619.1 kPa
อัตราการไหลของ Air Intake :	3653585 SCFD x 40
	146143400 SCFD

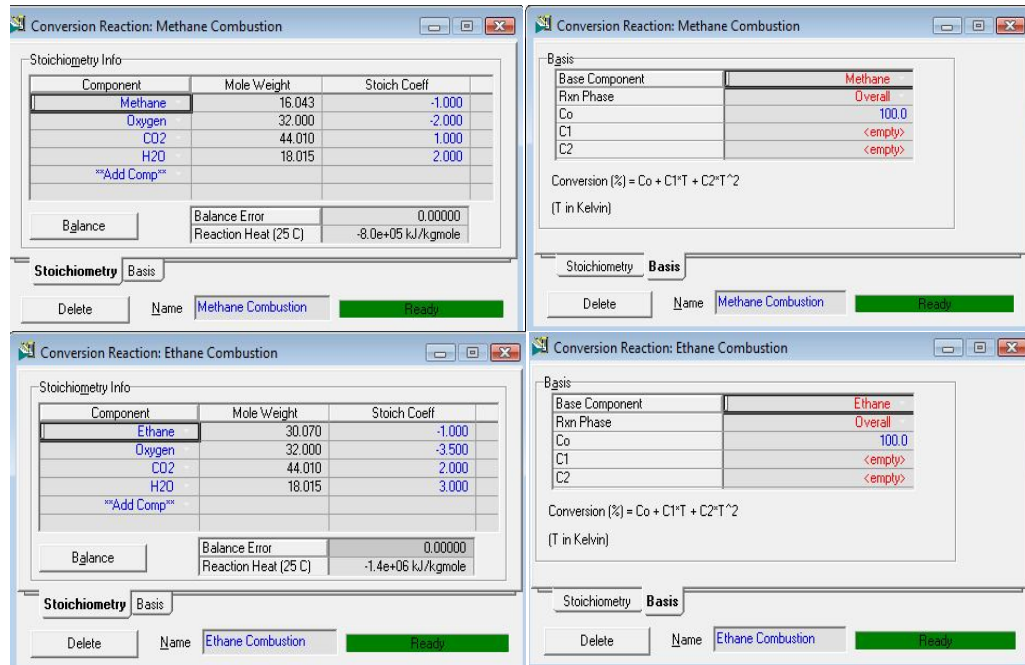
และดำเนินการปรับแต่งค่า Adiabatic Efficiency ของ GG Compressor จนกระทั่ง ค่า อุณหภูมิ (T3) ของ Compressed Air Stream เท่ากับสถานะจากการเดินเครื่องจริง

อุณหภูมิของ Compressed Air :	292.3 องศาเซลเซียส
Adiabatic Efficiency ของ GG Compressor :	75.4

4.2.3. การตั้งค่างปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้

จรรยาบรรณของกระบวนการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับความดัน กระบวนการเผาไหม้ที่ เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซจะมีความดันเท่ากับ Compressor Discharge Pressure แม้ว่าความดันของเชื้อเพลิงจะมีค่ามากกว่าก็ตาม แต่ด้วยอัตราส่วนโดยมวลที่น้อยกว่ากัน มาก ความดันของเชื้อเพลิงจะลดลงตามระยะห่างจากหัวฉีดเชื้อเพลิงจนกระทั่งเท่ากับ Compressor Discharge Pressure จึงสามารถใช้ Compressor Discharge Pressure เป็นความดันของปฏิกิริยา ในการจำลองสามารถกำหนดให้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทำปฏิกิริยาจนหมดไป หรือ ค่า Conversion ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 100% เนื่องจากการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงบาง เมื่อตรวจสอบ ค่าองค์ประกอบของไอเสียที่ปล่อยไอเสีย ผลการตรวจสอบไม่พบปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่เป็น นัยสำคัญ เป็นการสนับสนุนสมมุติฐานดังกล่าว

การตั้งค่า Reaction ของปฏิกิริยาสันดาปของก๊าซธรรมชาติซึ่งประกอบไปด้วยปฏิกิริยา สันดาปมีเทน และปฏิกิริยาสันดาปอีเทน ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงการตั้งค่า Reaction Package ในการจำลองปฏิกิริยาเผาไหม้

4.2.4. การหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

ใส่ข้อมูลของอุณหภูมิของไอเสียจากกังหันต้นกำลัง (T6) และทดลองกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์ จนกระทั่งได้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไฟฟ้าเท่ากับข้อมูลจากการผลิตจริง โดยสมมุติฐานที่ว่าความสูญเสียทางกลของเครื่องผลิตไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้ ค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่หาได้จากวิธีการนี้ จะยังไม่ใช่ปริมาณอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ เนื่องจากมีอากาศส่วนหนึ่งที่ถูกดึงออกมาทาง Air Sealing & Cooling Port ที่จะไม่เข้าไปทำปฏิกิริยาสันดาปในห้องเผาไหม้โดย แต่จะถูกส่งไปทำหน้าที่ซีลและทำความเย็นแล้วกับมารวมอยู่ที่ขาเข้าของกังหันต้นกำลัง

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการป้อนค่าอุณหภูมิ (T6) ของ PT Exhaust Stream และปรับค่าของอัตราการไหล Air Intake Stream จนได้กำลังการผลิต 9.53 MW

อุณหภูมิของ PT Exhaust : 409.4 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของ Air Intake : 2.63×10^5 kg/hr

4.2.5. การหาอัตราส่วน Air Sealing & Cooling

เป็นขั้นตอนที่จะหาอัตราส่วนระหว่าง Air Sealing & Cooling กับอากาศที่จะเข้าไปในห้องเผาไหม้ โดยการทดลองปรับอัตราส่วนดังกล่าว (ค่าที่ประมาณ 10% เป็นค่าแนะนำจากผลการทดลอง) จนกว่าค่าอุณหภูมิของไอเสียจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (T5) จะเข้าใกล้กับ ค่าที่ได้จากการวัดจริงจากระบบควบคุมเครื่องยนต์ โดยทดลองศึกษาปัจจัยที่จะกระทบต่อปริมาณ Air Sealing & Cooling ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า Compressor Discharge Pressure และสภาพซีลภายในเครื่องยนต์เป็นหลัก

ทำการปรับค่า Flow Ratio ของ Air Sealing Port จนกระทั่ง ค่าอุณหภูมิ (T5) ของ GG Exhaust เท่ากับค่าที่วัดได้จริง

ค่าอุณหภูมิของ GG Exhaust :	559.6 องศาเซลเซียส
ค่า Flow Ratio ของ Air Sealing Port :	0.143 PT Sealing Air 0.857 Combustion Air

4.2.6. การพิสูจน์แบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้เราจะทราบปริมาณอากาศที่จะเข้าไปในห้องเผาไหม้ ปริมาณอากาศที่เข้าไปในห้องเผาไหม้บางส่วนจะเกิดปฏิกิริยาสันดาปกับเชื้อเพลิง ส่วนที่เหลือจะทำหน้าที่ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.1.3 และถือว่าค่าต่างๆที่โปรแกรมคำนวณในแบบจำลอง สามารถเทียบเคียงกับ ค่าที่ได้จากการเดินเครื่องจริง ซึ่งถือว่าการตรวจสอบแบบจำลองความแม่นยำของแบบจำลองที่สภาวะนั้น

จากการนำสภาวะการเดินเครื่องจริง แล้วทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4.2.1 ถึง 4.2.5 เพื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละค่าที่ป้อนที่เปลี่ยนไป โดยจะทำการอภิปรายผลในบทที่ 5 ต่อไป

4.2.7. ค่าขอบเขตที่ได้จากการจำลอง

หลังจากการตรวจสอบแบบจำลองจนมั่นใจว่าสอดคล้องกับข้อมูลจากโรงงาน เราจะมีข้อมูลของเงื่อนไขขอบเขตซึ่งประกอบไปด้วย ค่าอุณหภูมิ ความดัน องค์กรประกอบ และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (fuel supply) อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (combustion air) และไอเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้ (expansion gas) ของแต่ละสภาวะเดินเครื่องไปเป็นข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและจำลองกระบวนการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ เพื่อใช้ในการทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

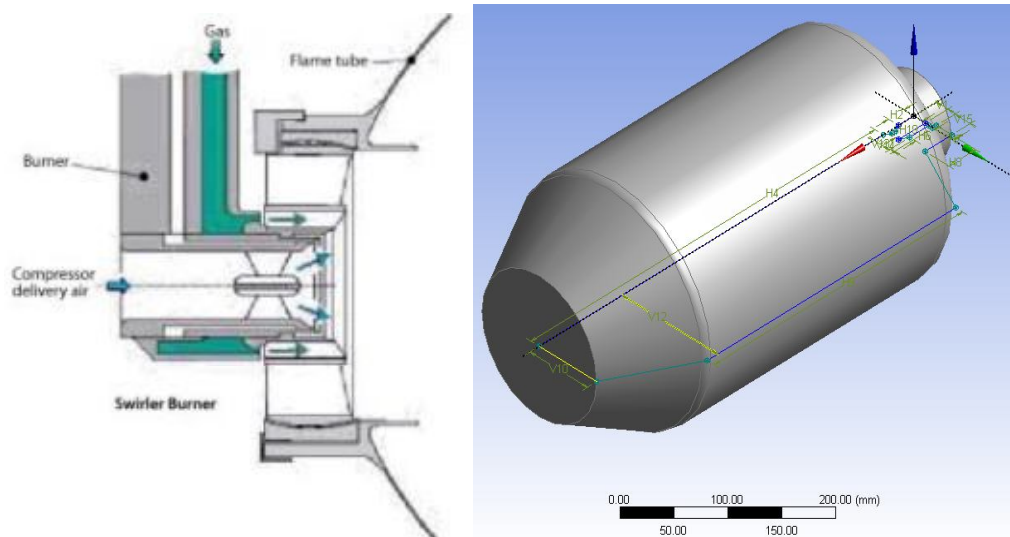
ค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ได้จากการจำลองด้วย HYSYS สามารถสรุปได้ดังนี้	
อุณหภูมิของ Fuel Supply :	28 องศาเซลเซียส
ความดันของ Fuel Supply :	840 kPa
องค์ประกอบของ Fuel Supply :	96.4% มีเทน โดยโมล 0.9% อีเทน โดยโมล 0.1% คาร์บอนไดออกไซด์ โดยโมล 2.6% ไนโตรเจน โดยโมล
อัตราการไหลของ Fuel Supply :	3004 kg/hr
อุณหภูมิของ Combustion Air :	292.3 องศาเซลเซียส
ความดันของ Combustion Air :	619.1 kPa
องค์ประกอบของ Combustion Air :	79.2% ไนโตรเจน โดยโมล 20.8% ออกซิเจน โดยโมล
อัตราการไหลของ Combustion Air :	2.254×10^5 kg/hr
อุณหภูมิของ Expansion Gas :	826.6 องศาเซลเซียส
ความดันของ Expansion Gas :	619.1 kPa
องค์ประกอบของ Expansion Gas :	15.8% ออกซิเจน โดยโมล 2.3% คาร์บอนไดออกไซด์ โดยโมล 4.5% น้ำ โดยโมล 77.4% ไนโตรเจน โดยโมล
อัตราการไหลของ Expansion Gas :	2.284×10^5 kg/hr

4.3 ขั้นตอนการจำลองห้องเผาไหม้ด้วย FLUENT

เพื่อที่จะจำลองห้องเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ จะเริ่มจากการสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตของหัวฉีดเชื้อเพลิงและห้องเผาไหม้ ในโปรแกรม Geometry ที่อยู่ภายใต้ Component Systems การสร้างรูปทรงจะสร้างเพียงชุดห้องเผาไหม้ 1 ชุด จากทั้งหมด 8 ชุด เพื่อลดการทำงานที่ไม่จำเป็นของเครื่อง Computer โดยจะสมมุติว่าสภาพของห้องเผาไหม้ทั้งหมดมีสภาพที่เหมือนกันทุกประการ และเฉลี่ยอัตราการไหลเชิงมวลจากเงื่อนไขขอบเขตที่ได้จากการจำลองด้วย HYSYS ในการป้อนค่าให้กับแบบจำลองของ FLUENT

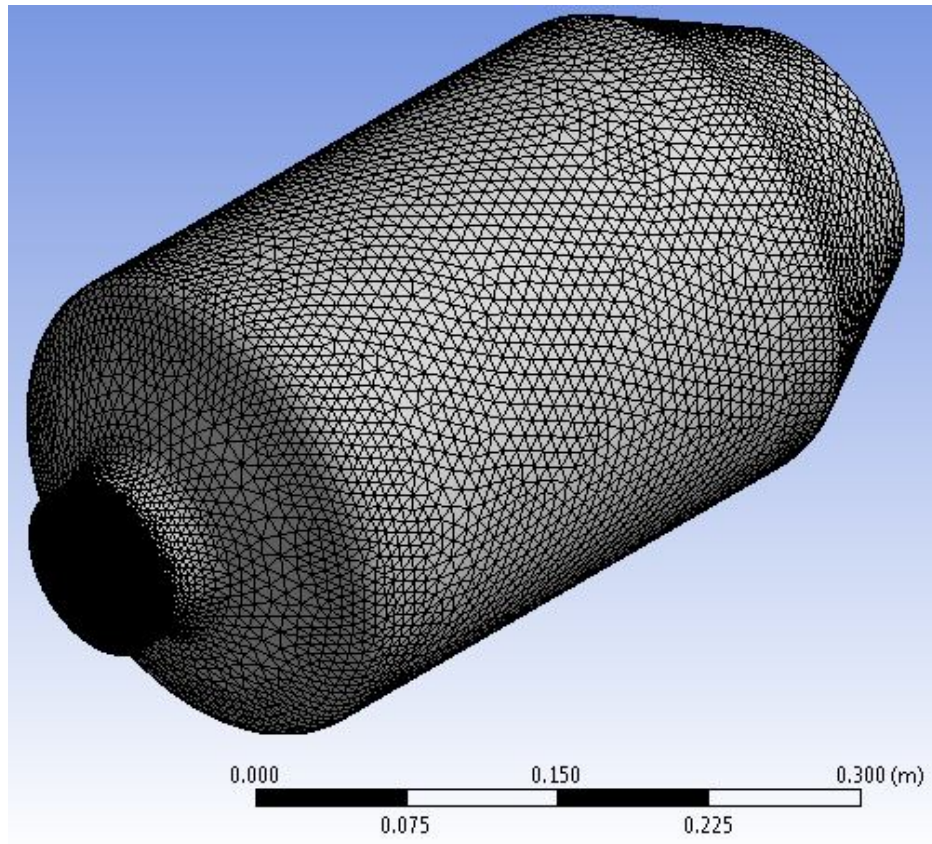
อัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปในแต่ละห้องเผาไหม้ในหน่วย kg/s ดังนี้

อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า :	0.1043 kg/s
อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้า :	7.9306 kg/s
ค่าความดันภายในห้องเผาไหม้ :	619.1 kPa



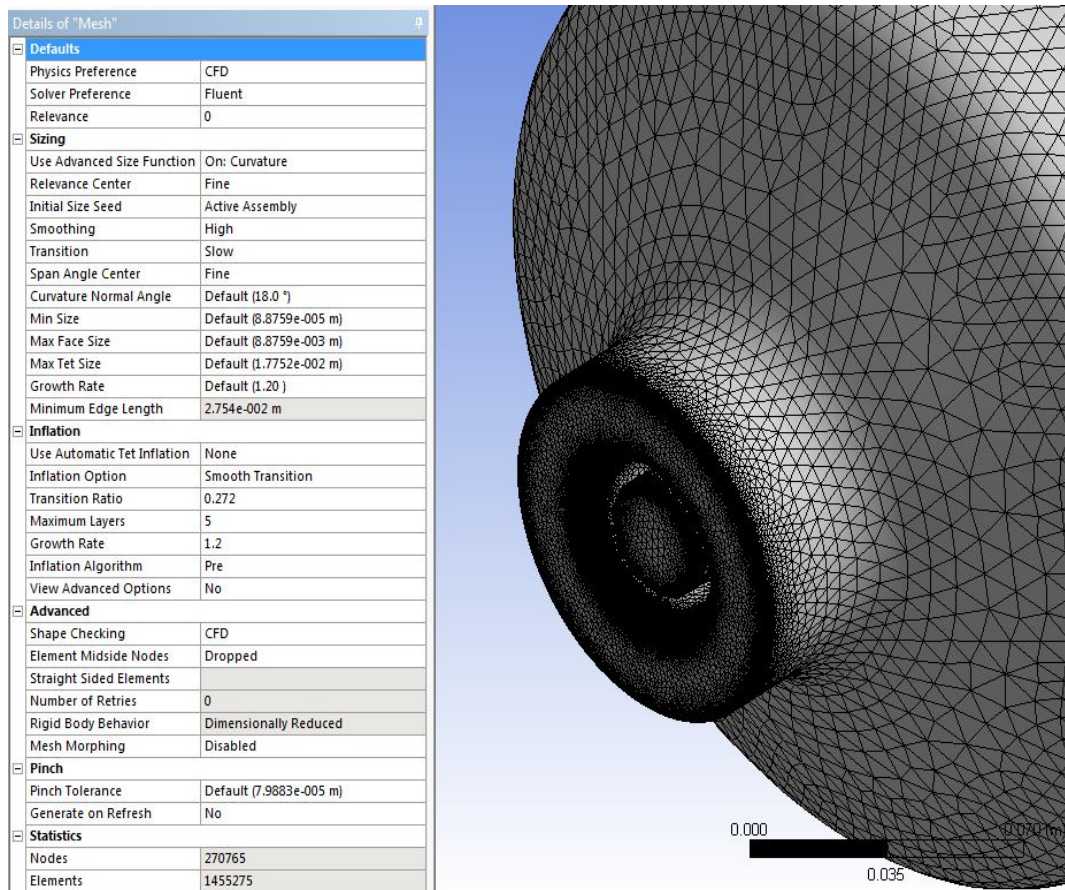
ภาพที่ 4.3 ด้านซ้ายแสดงภาพตัดขวางของหัวฉีดเชื้อเพลิง ด้านขวาแสดงรูปทรงเรขาคณิตของห้องเผาไหม้และหัวฉีดเชื้อเพลิง

จากการวัดขนาดของหัวฉีดและห้องเผาไหม้ เป็นข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างรูปทรงเรขาคณิต เพื่อให้การทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์แม่นยำ แต่ต้องแลกกับระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของเครื่อง Computer ถ้าหากกำหนดรายละเอียดตอนสร้างแบบจำลองมากเกินไป ความจำเป็นในงานวิจัยนี้ จะใช้รูปทรงเรขาคณิต ตามที่แสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.4 แบบจำลองของห้องเผาไหม้ หลังทำการ Meshing

ในขั้นตอนถัดไปจะเป็นการ Meshing โดยกำหนด Physical Preference ให้เป็น CFD และ Solver Preference ให้เป็น FLUENT และ Mesh Method ให้เลือกเป็น Automatic (patch/conforming/sweeping) เพื่อการ MESHING เหมาะสมกับการคำนวณภายในโปรแกรม CFD FLUENT ตัวอย่างการตั้งค่าแสดงในภาพที่ 4.4 ก่อนที่จะ Export หรือใช้งาน Meshing โดยโปรแกรม FLUENT เพื่อตั้งค่าการคำนวณทาง CFD จำเป็นต้องสร้าง Name Selection ของแต่ละเงื่อนไขขอบเขตซึ่งประกอบไปด้วย Fuel Gas Inlet, Combustion Air Inlet, Burner Wall, Combustion Liner และ Exhaust เป็นการนิยามพื้นผิวที่จะป้อนค่าเงื่อนไขขอบเขต



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างการตั้งค่า Mesh Control เพื่อสร้าง Mesh จำลองโครงสร้างเครื่องปฏิกรณ์ย่อยภายในห้องเผาไหม้

เมื่อจัดทำข้อมูลทางเรขาคณิตและทำการ Meshing รูปทรงเรขาคณิตแล้วเสร็จ ในขั้นตอนถัดไป จะเป็นการ Import Meshing ที่สร้างขึ้น เข้าสู่โปรแกรม FLUENT เพื่อตั้งค่าการแก้ไขปัญหาด้วย CFD ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.3.1 การตั้งค่าปัญหา จำเป็นต้องระบุข้อมูลดังต่อไปนี้

- ข้อมูลทั่วไป (general)

ข้อมูลทั่วไปจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ประกอบไปด้วยกลุ่มที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ Mesh โดยคุณภาพของการ Meshing จะใช้ Parameter ที่มีชื่อเรียกว่า Skewness, Aspect ratio และ Squish index โดยค่าเหล่านี้ไม่ควรที่จะเกิน 0.95, 35:1 และ 0.99 ตามลำดับ เพื่อป้องกันการ Divergent ของผลการคำนวณ ในส่วนของกลุ่มที่ 2 จะใช้ในการตั้งค่า Solver ซึ่งจะสามารถเลือกได้

ว่าจะเลือก Solver ให้เป็น Pressure-based หรือ Density-based ในกรณีนี้จะใช้ Pressure-based เนื่องจากของไหลที่ใช้ใน FLUENT จะเป็นสถานะก๊าซทั้งหมด

- ชนิดของแบบจำลอง (models)

ใช้สำหรับกำหนดชนิดของแบบจำลอง ในการจำลองกระบวนการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ กังหันก๊าซ ในกรณีของ Gas Fuel ของไหลทั้งหมดจะอยู่ในสถานะก๊าซเพียงสถานะเดียว ให้ปิดการทำงานของแบบจำลอง Multiphase (multiphase-off) ในกรณีที่ป็นหัวฉีดเป็นชนิด Liquid Fuel จะมีการเปลี่ยนสถานะภายในห้องเผาไหม้ ให้เปิดการทำงานของแบบจำลอง Multiphase (multiphase-on) ในงานวิจัยนี้เชื้อเพลิงซึ่งเป็นก๊าซธรรมชาติ จะอยู่ในสถานะก๊าซทั้งหมดเนื่องจากการเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงาน (energy-on) และมีปฏิกิริยาเผาไหม้เกิดขึ้น (species-non-premixed combustion) และต้องการวิเคราะห์การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx-on)

- ชนิดของไหล (materials)

เมื่อต้องการจำลองกระบวนการเผาไหม้ จำเป็นต้องกำหนดชนิดของ Mixture หรือ องค์ประกอบทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบไปด้วยมีเทน อีเทน โพรเพน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และอื่นๆถ้าปริมาณมีนัยสำคัญ และต้องกำหนดองค์ประกอบของ Oxidizer หรือ องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

- เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions)

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม HYSYS ในขั้นตอนที่ 4.2.7 จะนำมาใช้ในการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะต้องป้อนค่าเงื่อนไขขอบเขต ในที่นี้จะประกอบไปด้วย Combustion_air_inlet, Combustion_liner, Exhaust, Fuel_gas_inlet, Interior-Solid, Swirler_burner และ Wall-solid (ชื่อของเงื่อนไขขอบเขตจะขึ้นอยู่ในขั้นตอนการกำหนด Name Selection ในช่วงที่สร้าง Mesh) ในการป้อนค่าเงื่อนไขขอบเขตจะต้องทำการระบุ Turbulence – Specification Method ให้เป็น Intensity and Hydraulic Diameter ซึ่งจะต้องการการคำนวณค่า Turbulent Intensity (%) และ Hydraulic Diameter (m)

4.3.2 การตั้งค่าวิธีการหาคำตอบ จำเป็นต้องระบุข้อมูลดังนี้

- กำหนดจุดเริ่มต้นของการหาคำตอบ (solution initializations)

เป็นการระบุทำให้เริ่มการคำนวณจากเงื่อนไขขอบเขตใด โดยสามารถเลือกให้เริ่มจากทุกเงื่อนไขขอบเขต (all-zones) หรือเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งก็ได้ โปรแกรมจะคำนวณค่าเริ่มต้นที่แนะนำให้โดยอัตโนมัติ ซึ่งผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงได้หากคาดการณ์ค่าเหล่านั้นได้ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ของคำตอบที่แท้จริง ในกรณีที่ประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการภายในห้องเผาไหม้ จากผลการวิจัยพบว่า การกำหนดให้เริ่มต้นการคำนวณจาก Fuel gas inlet ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้ปฏิกิริยาเคมีมากที่สุด จะทำให้การคำนวณลู่เข้าได้เร็วที่สุด

- การคำนวณหาคำตอบ (run calculation)

ในหัวข้อนี้เราสามารถตรวจสอบความสมบูรณ์ของการตั้งค่าทั้งหมดจากการเลือก Check Case ได้ โดยโปรแกรมจะแจ้งเตือนข้อบกพร่องให้ทราบก่อนการทำการคำนวณจริง (run calculation) ซึ่งต้องเสียเวลาอย่างมาก หากท้ายที่สุดมีข้อผิดพลาดที่ไม่สามารถแสดงผลจากการคำนวณได้ และก่อนที่จะทำการคำนวณ จะต้องระบุจำนวนครั้งในการทำซ้ำ (number of iterations) และความถี่ที่จะให้แสดงผลพัทธ์ระหว่างการทำซ้ำ (reporting interval)

4.3.3 การแสดงผลพัทธ์จากการหาคำตอบ จำเป็นต้องระบุข้อมูลดังนี้

- การแสดงภาพและภาพเคลื่อนไหว (graphics and animations)

ในหัวข้อนี้จะใช้แสดงข้อมูลที่เราสนใจ ในมุมมองต่างเช่น Mesh, Contours, Vectors, Path lines และ Particle track ในรูปแบบที่เป็นภาพนิ่ง หรือมุมมองที่เป็น Sweep Surface, Scene animation และ Solution animation playback หากต้องการแสดงภาพเคลื่อนไหว ในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองเฉพาะสภาวะที่เป็น Steady-state จึงใช้เฉพาะรูปแบบที่เป็นภาพนิ่งเท่านั้น

- การแสดงรายงาน (report)

เช่นเดียวกันกับการแสดงภาพและภาพเคลื่อนไหว แต่การแสดงรายงานจะแสดงค่าในเชิงตัวเลข (numerical) ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง หรือพื้นที่ที่กำหนด ซึ่งสามารถจะแสดงผลได้ทั้ง Area-weighted average หรือ Mass-weighted average ก็ได้

จากการแสดงรายงานในรูปแบบปริมาณสัดส่วนค่าไนโตรเจนออกไซด์ ที่ผ่านออกมาจากเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 62.9 ppm ที่ 7% ออกซิเจนโดยมวล

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 ผลการวิเคราะห์

หลักจากที่แบบจำลองได้ถูกพิสูจน์โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของข้อมูลที่วัดได้โดยตรงจากในขั้นถัดไปจะทำการศึกษาถึงผลกระทบของค่าข้อมูลป้อนเข้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะเดินเครื่องจริง ต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เครื่องยนต์กักกันก๊าซปลดปล่อยออกมา โดยผลกระทบที่พิจารณา จะเกี่ยวข้องกับผลกระทบที่จะทำให้เงื่อนไขขอบเขตโดยรอบห้องเผาไหม้เปลี่ยนแปลงของสายป้อนเชื้อเพลิง สายป้อนของอากาศ และขาออกบริเวณไอเสีย ที่สามารถแปรผันได้ ตามสภาวะการเดินเครื่องจริง ประกอบไปด้วย

- ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า

ในกลไกการทำงานของเครื่องยนต์ ลินควบคุมปริมาณการป้อนเข้าของเชื้อเพลิง จะทำงานตามระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยวัดการวัดความเร็วรอบเพลลาของกักกันต้นกำลังซึ่งต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อไรก็ตามที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ความเร็วรอบของเพลลา กักกันต้นกำลังจะลดลง เพื่อควบคุมความถี่ทางไฟฟ้าให้คงที่ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบ ลินควบคุมปริมาณการป้อนเข้าของเชื้อเพลิงก็จะเปิดเพิ่มขึ้น จนกระทั่งสามารถรักษาความเร็วรอบของเพลลา กักกันต้นกำลังให้คงที่ตามลำดับ และในทางกลับกันถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการผลิตลดลง ลินควบคุมจะเปิดน้อยลง กรณีผลกระทบจากกำลังการผลิตไฟฟ้า จะอธิบายผลการวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อที่ 5.2

- องค์กรประกอบของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า

เชื้อเพลิงที่ใช้ป้อนเข้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามตำแหน่งที่เลือกใช้และสภาวะของกระบวนการผลิตขณะนั้น ผ่านระบบกรองให้บริสุทธิ์ ก่อนที่จะส่งเข้าไปในห้องเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปองค์กรประกอบของเชื้อเพลิง กรณีผลกระทบจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จะอธิบายผลการวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อที่ 5.4

- อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า

เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าจากตำแหน่งที่เลือกใช้ มีระยะทางของท่อจ่ายเชื้อเพลิงค่อนข้างไกล ประกอบกับขนาดของท่อจ่ายเชื้อเพลิงได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ ความดันลดจากการไหลในท่อและอุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อม สามารถทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามระบบจ่ายเชื้อเพลิงโดยปกติ ถ้าหากผลของการออกแบบแสดงว่ามีโอกาสที่จะเกิดการควบแน่นขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง ผู้ออกแบบจะกำหนดให้ติดตั้งขดลวดความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่สูงกว่าจุดน้ำค้างตลอดเวลา เพื่อให้เชื้อเพลิงที่จ่ายเข้าไปในห้องเผาไหม้เป็นสถานะก๊าซเท่านั้น (ชนิดของหัวฉีดที่ใช้เหมาะกับเชื้อเพลิงที่เป็นสถานะก๊าซ) ประกอบกับปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเทียบกับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เข้าไปในห้องเผาไหม้น้อยมาก จนไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิในการเผาไหม้ จึงไม่พิจารณาถึงผลกระทบจากปัจจัยดังกล่าว

- ความดันของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า

ความดันของเชื้อเพลิงป้อนเข้าจะถูกควบคุมผ่านตัวปรับความดัน และลิ้นควบคุมปริมาณการป้อนเข้าของเชื้อเพลิงตามปริมาณที่เครื่องยนต์ต้องการเช่นเดียวกันกับวิธีการปรับเปลี่ยนปริมาณเชื้อเพลิงป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้ และด้วยปริมาณของเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าอากาศมาก ผลกระทบต่อความดันในการทำปฏิกิริยาสันดาปจึงน้อยมาก จึงไม่พิจารณาถึงผลกระทบจากปัจจัยดังกล่าว

- ปริมาณของอากาศที่ป้อนเข้า

ปริมาณอากาศป้อนเข้าจะขึ้นอยู่กับภาระงานของเครื่องยนต์โดยตรง เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะเป็นกลายเริ่มต้นกำลังในการปั่นใบพัดกังหันก๊าซ (gas turbine blade) และใบพัดกังหันต้นกำลัง (power turbine blade) แม้ว่าปริมาณอากาศป้อนเข้าจะเปลี่ยนแปลงโดยสัมพันธ์กับภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลัก แต่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศยังคงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของอากาศ ประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ ประสิทธิภาพของซีลภายในเครื่องยนต์ (seal clearance) และการรั่วของอากาศผ่าน Bleed Valve ล้วนกระทบต่อปริมาณอากาศป้อนเข้าทั้งสิ้น

- อุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้า

เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิของอากาศโดยรอบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ซึ่งจะถูกดูดผ่านกระบวนการอัดโดยเครื่องอัดอากาศ อุณหภูมิของอากาศที่ถูกอัดก็จะเพิ่มขึ้นตามกลไกของ Thermodynamics ค่าของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากกระบวนการดังกล่าวจะขึ้นมากหรือน้อยอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ กรณีผลกระทบจากค่าอุณหภูมิของ

อากาศที่ป้อนเข้า ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศ และ สมรรถนะของเครื่องอัดอากาศ จะอธิบายผลการวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อที่ 5.3 และหัวข้อที่ 5.5

- ความดันของอากาศที่ป้อนเข้า

ค่าที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยค่าความดันของอากาศป้อนเข้าจะเท่ากับ CDP สาเหตุที่ CDP ใช้บอกสมรรถนะของเครื่องยนต์เนื่องจากสมรรถนะจะแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนความดันของเครื่องอัดอากาศ (compression ratio) กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเครื่องอัดอากาศที่มีสมรรถนะสูง ก็จะสามารถเพิ่มความดันให้อากาศได้มาก ผลกระทบจากสมรรถนะของเครื่องยนต์ จะอธิบายผลในหัวข้อที่ 5.5

- อุณหภูมิของไอเสีย

ค่าอุณหภูมิของไอเสียจะเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์เป็นหลัก องค์ประกอบของเครื่องยนต์ที่ชื่อว่า Nozzle Guide Vane จะเป็นชิ้นส่วนที่ต้องรับความร้อนจากไอเสียโดยตรงก่อนที่จะผ่านไปยังใบพัดกังหันก๊าซ ซึ่งมีความสำคัญในมุมมองของการทำนายอายุการใช้งานของเครื่องยนต์สำหรับบริหารแผนงานบำรุงรักษา ทุกผลกระทบตั้งแต่ 5.2 – 5.5 จะสามารถทำให้ค่าอุณหภูมิของไอเสียเปลี่ยนแปลงได้ทั้งสิ้น

เมื่อพิจารณาค่าเงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ต่อกัน ในหลากหลายรูปแบบ ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการอธิบายผลที่จะกระทบต่อค่าเงื่อนไขขอบเขตโดยรอบห้องเผาไหม้ เพื่อศึกษาผลกระทบในด้านต่าง โดยแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้ ผลกระทบจากกำลังการผลิตไฟฟ้า ผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศ ผลกระทบจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และผลกระทบจากสมรรถนะของเครื่องยนต์ ต่อปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์

5.2 ผลกระทบจากกำลังการผลิตไฟฟ้า

กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะถูกนำไปใช้เป็นสาธารณูปการในกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ ระบบไฟฟ้าจะถูกต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำหรับใช้เพื่อกรณีที่ระบบไฟฟ้าภายในเกิดเหตุขัดข้อง และจ่ายไฟฟ้าบางส่วนที่เกินกว่ากำลังการผลิตรวมภายในโรงงาน เป็นที่แน่นอนว่าการซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตภายนอกจะมีต้นทุนที่สูงกว่า เพราะฉะนั้นในการกำหนดกลยุทธ์ด้านแผนการผลิต จะต้องเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงานด้วยกำลังการผลิตสูงสุดเท่าที่จะทำได้

การศึกษาผลกระทบจากกำลังการผลิตจะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงกำลัง เพื่อศึกษาผลกระทบต่อไนโตรเจนออกไซด์ที่กำลังการผลิตต่างๆ โดยจะเริ่มศึกษาตั้งแต่ 65% Load MW เป็นต้นไป เนื่องจากตัดผลกระทบเนื่องจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่กำลังต่ำจะมีการเปิด Bleed Valve และปรับองศา Variable Inlet Guide Vane แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะไม่สามารถรองรับการทำงานในลักษณะดังกล่าว และไม่มีควมจำเป็นต้องทำนายปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ในช่วงที่มีกำลังการผลิตต่ำ เพราะในช่วงดังกล่าวมีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ยังไม่สูงมาก

ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดบริเวณ Exhaust ของห้องเผาไหม้โดยใช้การเฉลี่ยเชิงมวล หรือ Mass-weight Average จะถูกจำลองแบ่งออกโดยกำลังการผลิตโดยละเอียดทุกๆ 65% Load, 70% Load, 75% Load, 80% Load, 90% Load, 95% Load และ 100% Load ที่อุณหภูมิของอากาศโดยรอบที่ 25 องศาเซลเซียส และใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่ใช้คือ

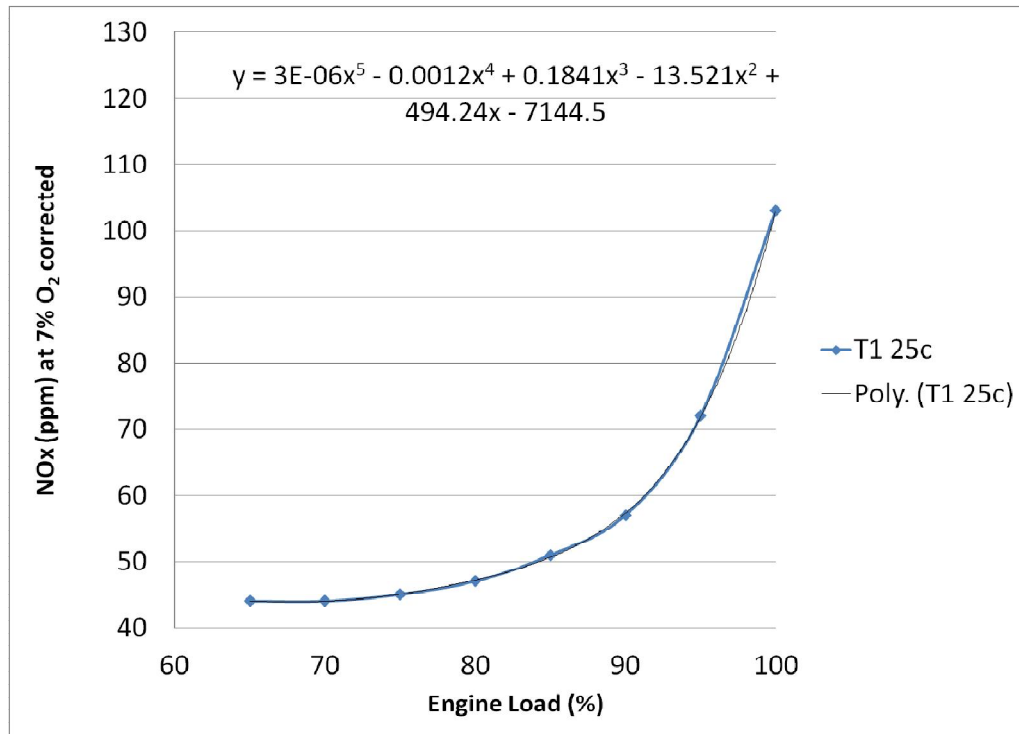
องค์ประกอบของ Fuel Supply :

- 96.4% มีเทน โดยโมล
- 0.9% อีเทน โดยโมล
- 0.1% คาร์บอนไดออกไซด์ โดยโมล
- 2.6% ไนโตรเจน โดยโมล

จากการคำนวณตามวิธีการในบทที่ 4 และสามารถสรุปผลการจำลองของแต่ละกำลังการผลิตดังนี้

Load	Power	Fuel Flow	Air Flow	CDP	NOx
%	MW	kg/s	kg/s	kPa	ppm
65	6.88	0.0803	5.7277	566.4	44.1
70	7.41	0.0841	6.1683	582.4	44.8
75	7.94	0.0882	6.6089	595.0	45.6
80	8.47	0.0926	7.0495	604.5	47.6
85	9.00	0.0966	7.4901	615.7	51.3
90	9.53	0.1012	7.9307	622.3	57.7
95	10.06	0.1053	8.3713	631.3	72.0
100	10.59	0.1101	8.8119	635.6	103.2

และเมื่อทำการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engine Load กับปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 5.1



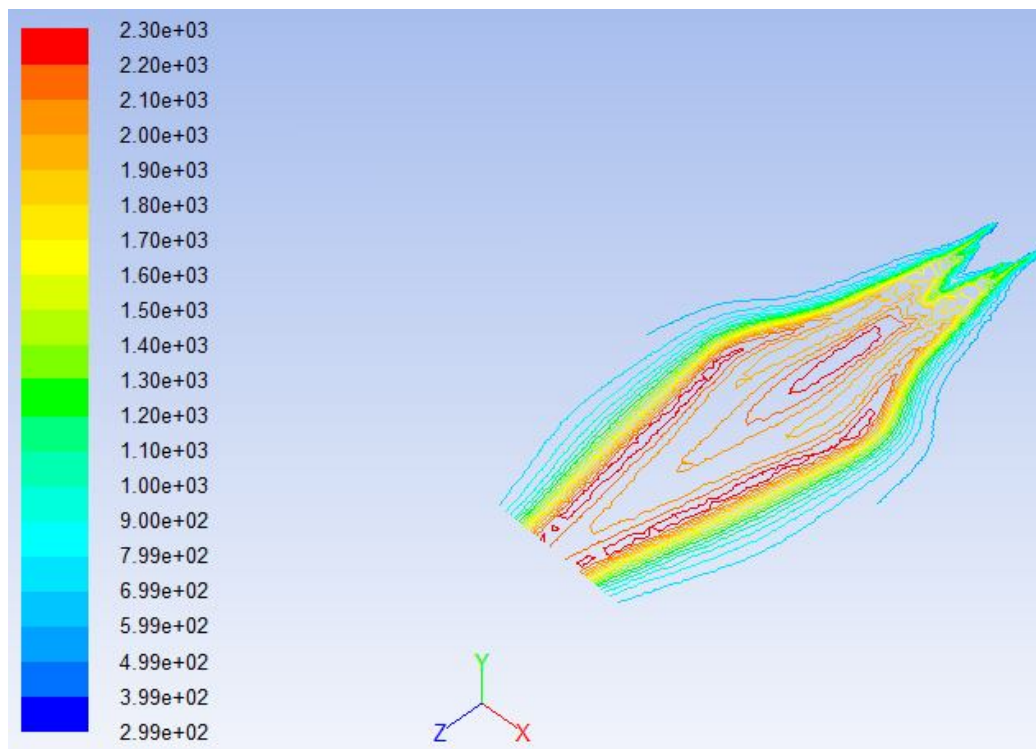
ภาพที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Engine Load กับปริมาณไนโตรเจนออกไซด์

จากกราฟความสัมพันธ์จะเป็นรูปแบบของสมการ Polynomial การเกิดไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเดินเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ Load สูงกว่า 90% เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เพิ่ม Engine Load น้อยกว่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิง เป็นผลทำให้การลดอุณหภูมิของเปลวเพลิงมีประสิทธิภาพลดลง เป็นผลทำให้ปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกำลังการผลิตไฟฟ้า

และเมื่อนำผลการจำลองที่ 90% Load หรือ 9.45MW มาศึกษาโดยละเอียดในด้านต่าง เช่น

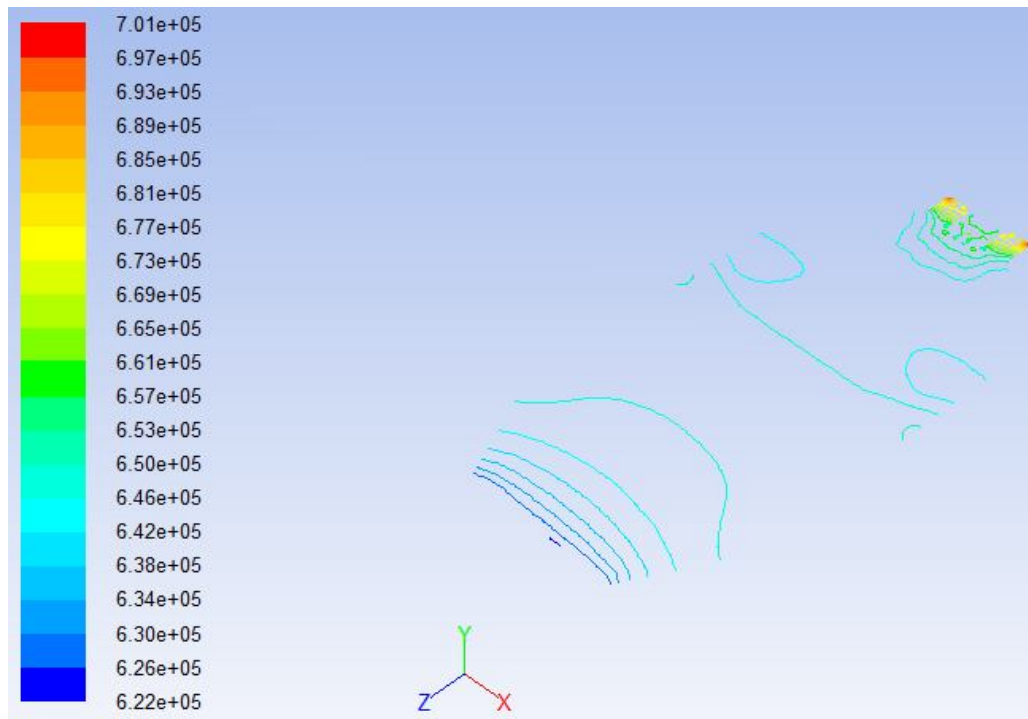
- Contour of Temperature ตามภาพที่ 5.2
- Contour of Pressure ตามภาพที่ 5.3
- Contour of Turbulent Kinetic Energy ตามภาพที่ 5.4
- Contour of Mass Fraction ตามภาพที่ 5.5, 5.6, 5.7 และ 5.8
- Contour of NOx Formation Rate ตามภาพที่ 5.9, 5.10 และ 5.11

- Contour of Velocity ตามภาพที่ 5.12



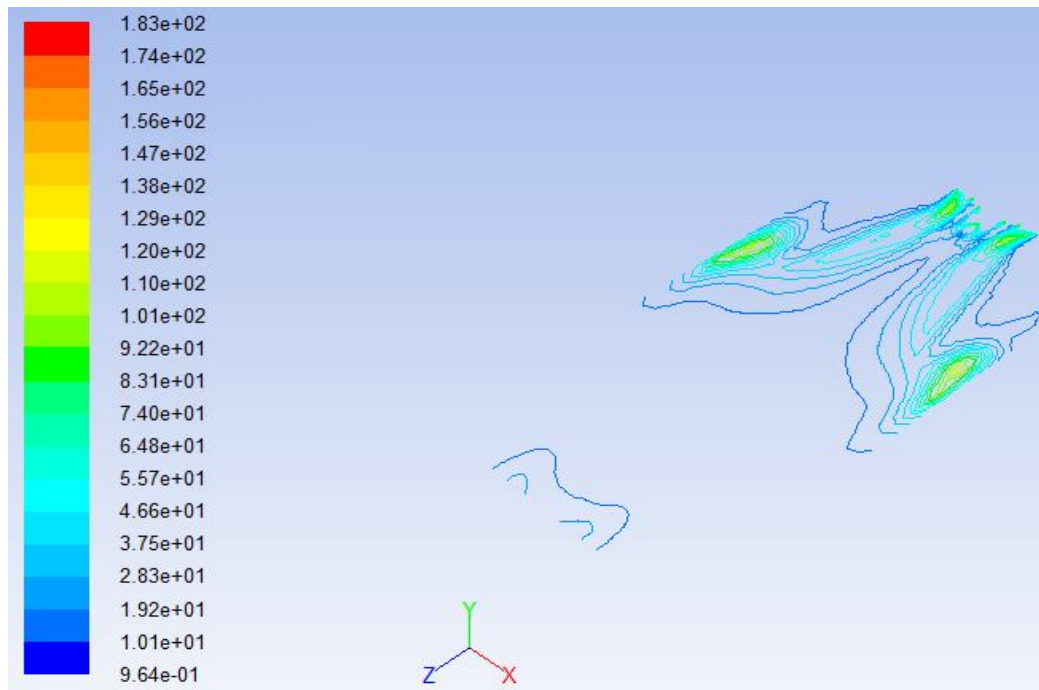
ภาพที่ 5.2 Contour ของ Temperature ที่ 90% Load (K)

จากรูปที่ 5.2 อุณหภูมิของเปลวเพลิงจะสูงกว่า 2000K ซึ่งจะเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาสันดาประหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ จาก Temperature Contour จะเห็นว่าอากาศจะโอบล้อมรอบเปลวเพลิง ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของเปลวเพลิงให้อยู่กึ่งกลางของผนังห้องเผาไหม้ ก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจะออกจากห้องเผาไหม้ โดยที่ไม่สัมผัสกับผนังของห้องเผาไหม้ ความดันภายในห้องเผาไหม้แสดงอยู่ในรูปที่ 5.3 บริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิงจะมีความดันสูงที่สุด และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผสมและเกิดปฏิกิริยาใหม่กับอากาศ บริเวณที่มีการเผาไหม้จะมีความดันสูงกว่า CDP เล็กน้อย ก่อนที่จะลดลงจนเท่ากับ CDP บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้



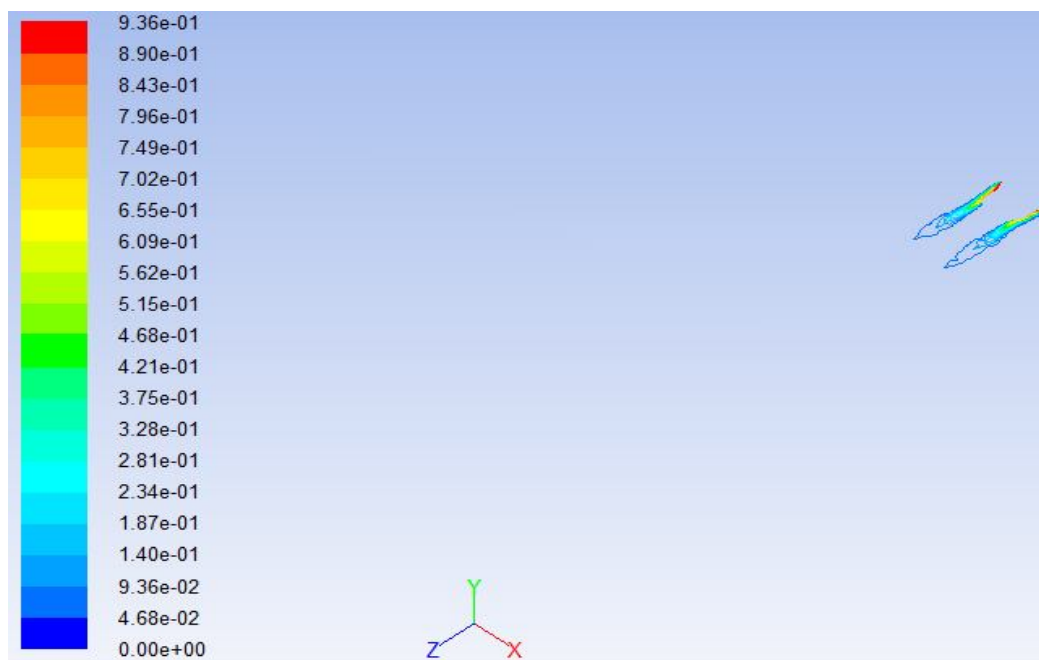
ภาพที่ 5.3 Contour ของ Pressure ที่ 90% Load (Pa)

เมื่อทำการวิเคราะห์ Contour ของ Turbulent Kinetic Energy ตามภาพที่ 5.4 พบว่ามี การปั่นป่วนบริเวณที่ใกล้หัวฉีด กับบริเวณพื้นที่ป้อนอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ผลิต ต้องการให้เกิดการปั่นป่วนให้เกิดการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้

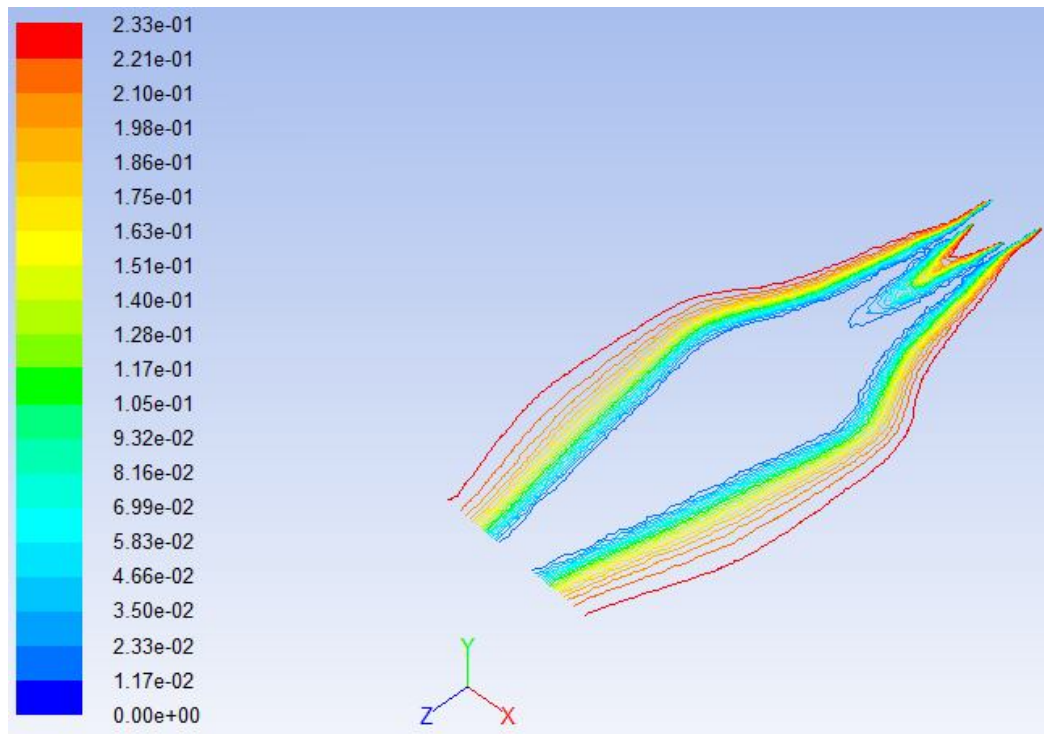


ภาพที่ 5.4 Contour ของ Turbulent Kinetic Energy ที่ 90% Load (m^2/s^2)

จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาสันดาป เชื้อเพลิงเกือบทั้งหมดจะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเผาไหม้ ตั้งแต่ฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ ตามภาพที่ 5.5 ในขณะเดียวกันอากาศซึ่งมีออกซิเจนทำหน้าที่เป็น Oxidizer ในปฏิกิริยาจะถูกใช้หมดไปบริเวณภายในเปลวเพลิง ตามภาพที่ 5.6

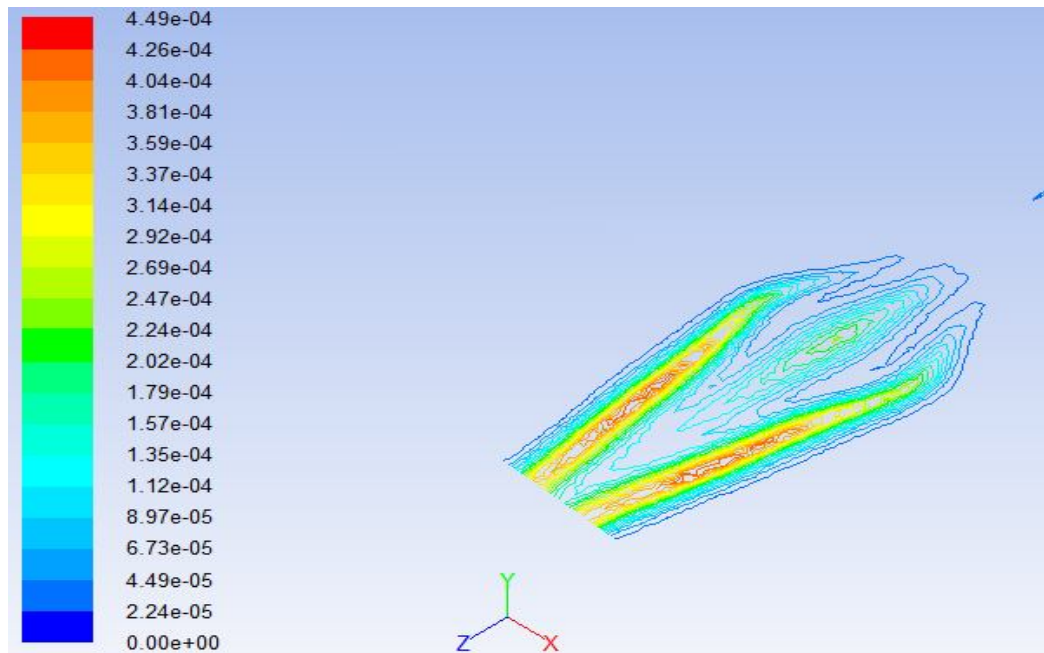


ภาพที่ 5.5 Contour ของ Methane Mass Fraction ที่ 90% Load

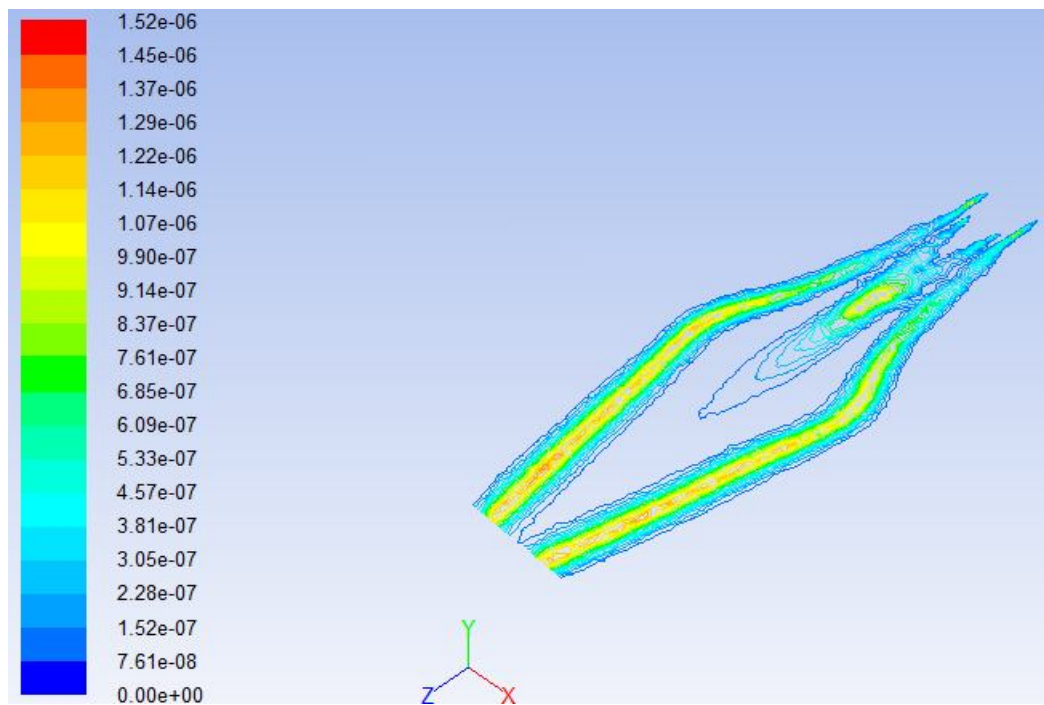


ภาพที่ 5.6 Contour ของ Oxygen Mass Fraction ที่ 90% Load

ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ ได้ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5.7 สำหรับไนตริกออกไซด์ (NO) และภาพที่ 5.8 สำหรับไนตรัสออกไซด์ (N_2O) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแถบสีที่แสดงอยู่ทางด้านซ้ายของรูปซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนเชิงมวลของสาร จะพบว่า การเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซชนิดนี้ ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมากกว่า 99% จะอยู่ในรูปของไนตริกออกไซด์ มีปริมาณของไนตรัสออกไซด์น้อยกว่า 1%



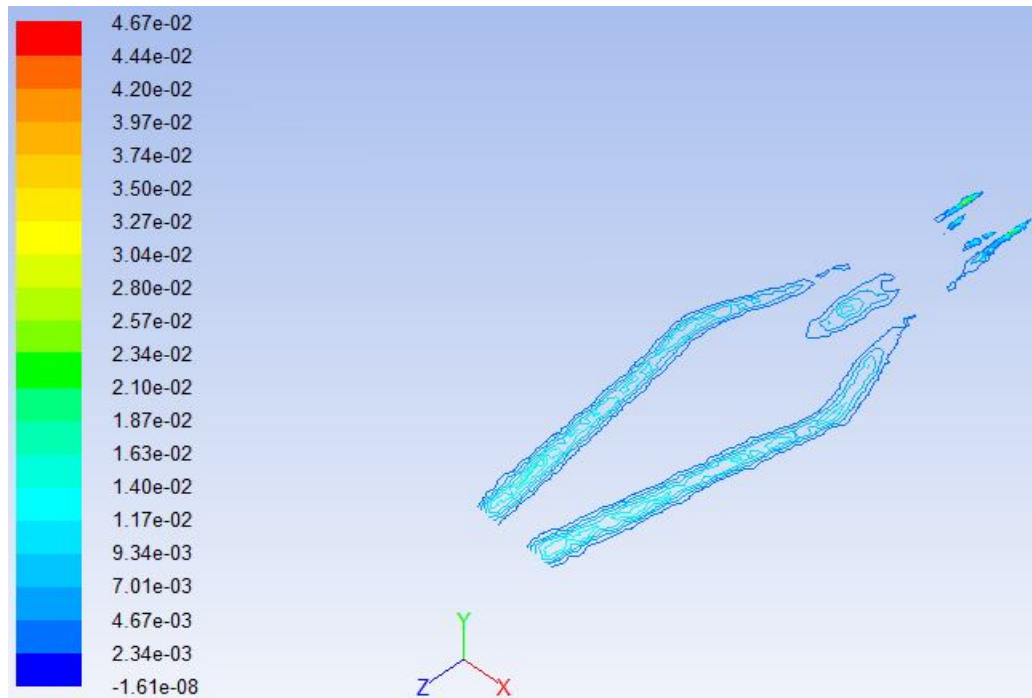
ภาพที่ 5.7 Contour ของ NO Mass Fraction ที่ 90% Load



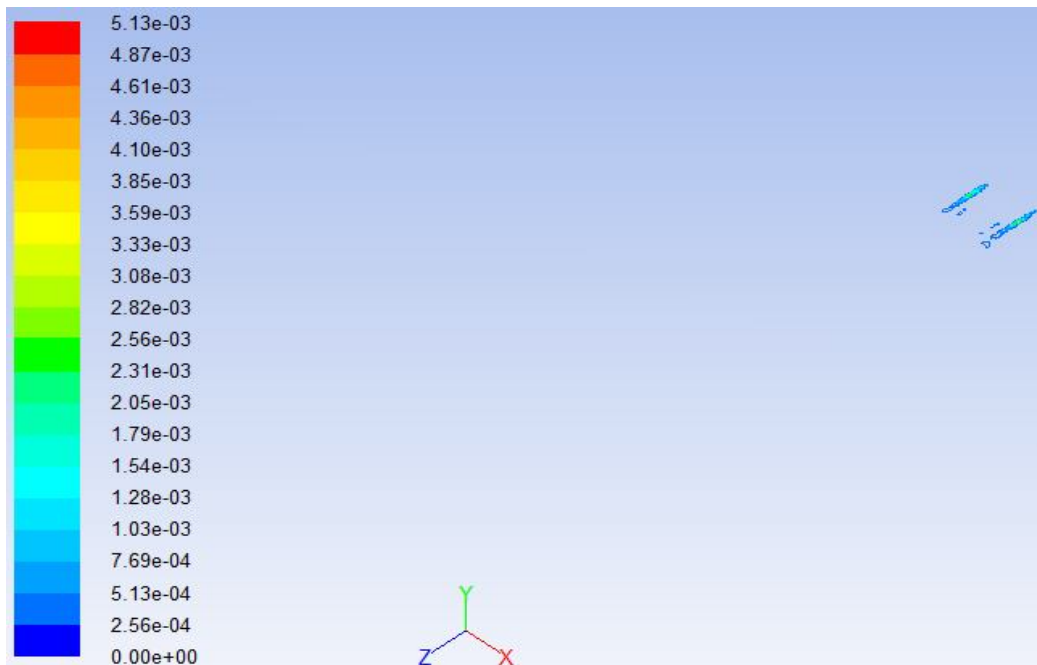
ภาพที่ 5.8 Contour ของ N₂O Mass Fraction ที่ 90% Load

และเมื่อทำการจำแนกรูปแบบการเกิดไนตริกออกไซด์ ตามอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ แต่ละประเภท ตามที่แสดงในภาพที่ 5.9, 5.10 และ 5.11 จะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ

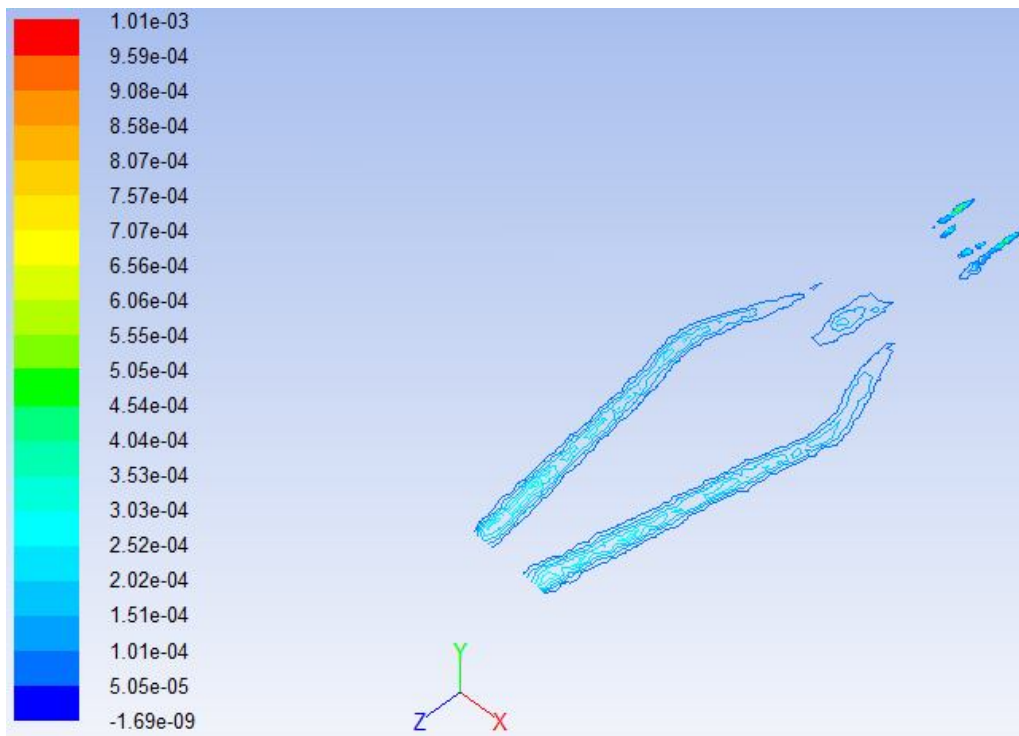
ไนโตรเจนออกไซด์จากอุณหภูมิ (thermal NOx) มีผลมากที่สุดโดยเฉพาะบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง รองลงมาคืออัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างรวดเร็ว (prompt NOx) ในบริเวณทางออกของ หัวฉีดเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสูง สุดท้ายอัตราการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ผ่านสาร ตัวกลางไนตริก ออกไซด์ (N2O intermediate Path NOx) จะมีค่าน้อยที่สุด ตามลำดับ



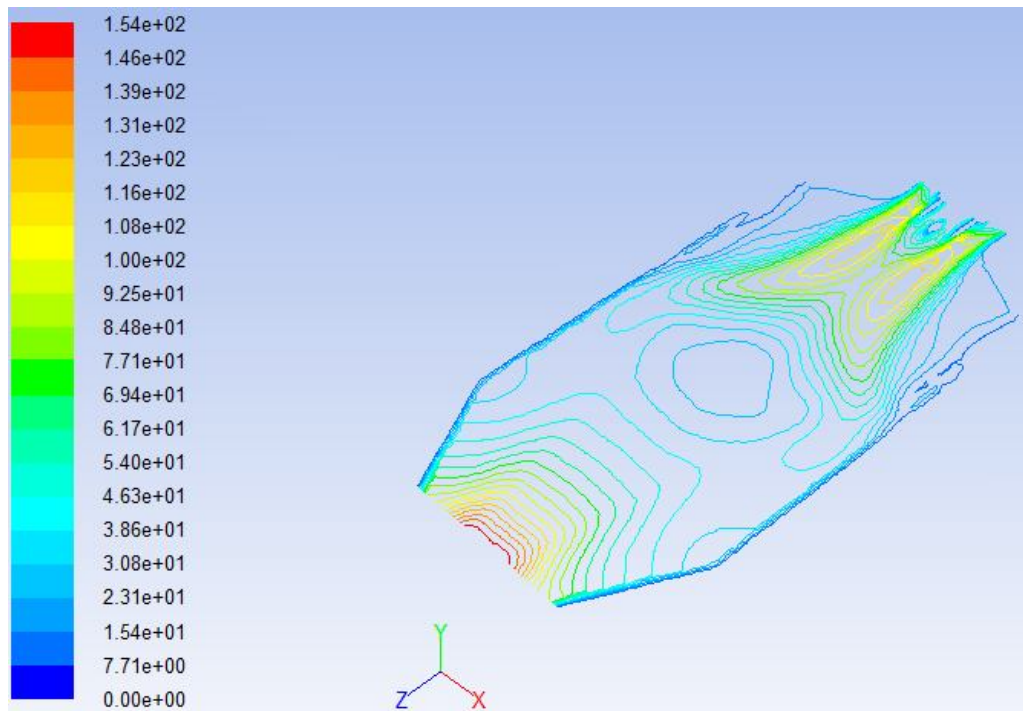
ภาพที่ 5.9 Contour ของ Thermal NO Rate ที่ 90% Load (kgmol/m³s)



ภาพที่ 5.10 Contour ของ Prompt NO Rate ที่ 90% Load ($\text{kgmol/m}^3\text{s}$)



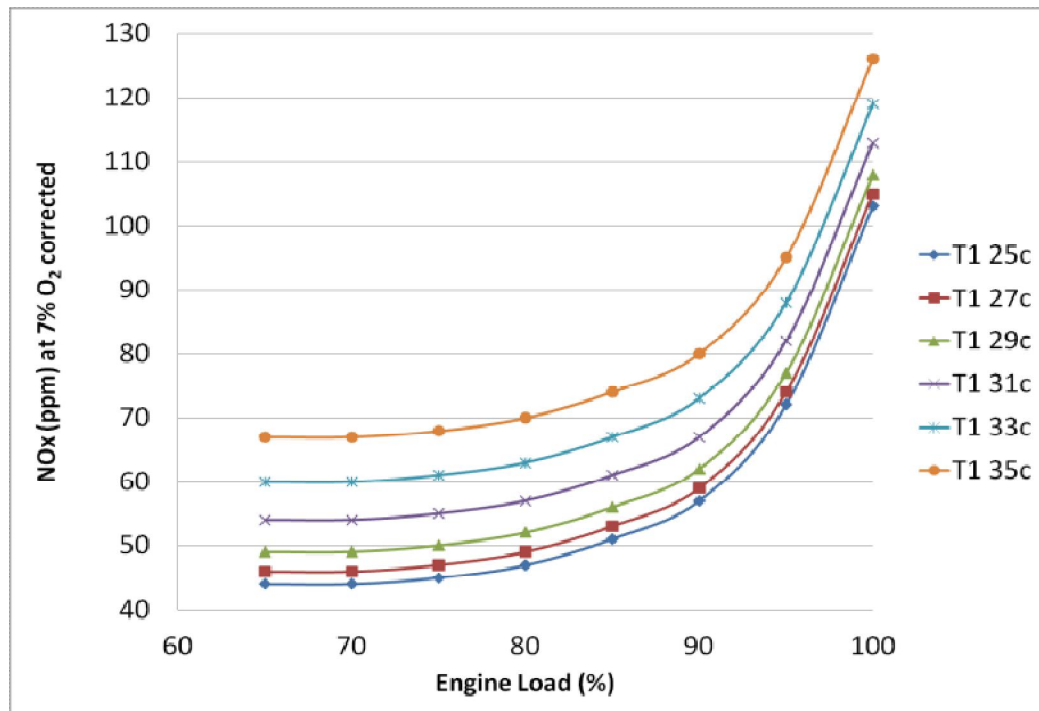
ภาพที่ 5.11 Contour ของ N₂O Path NO Rate ที่ 90% Load ($\text{kgmol/m}^3\text{s}$)



ภาพที่ 5.12 Contour ของ Velocity Magnitude ที่ 90% Load (m/s)

5.3. ผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศ

อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์กังหันก๊าซอย่างมาก และเป็นปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นช่วงกลางวันและกลางคืน หรือฤดูกาลในแต่ละปี ล้วนส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าว จะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กำลังการผลิตต่างๆ ด้วยวิธีการและเงื่อนไขเดียวกันที่อภิปรายไปแล้วในหัวข้อที่ 5.2 ที่อุณหภูมิต่างๆกันตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส ถึง 35 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มขึ้นที่จะมีค่าปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศตามการคำนวณโดยโปรแกรม FLUENT ดังแสดงในภาพที่ 5.13



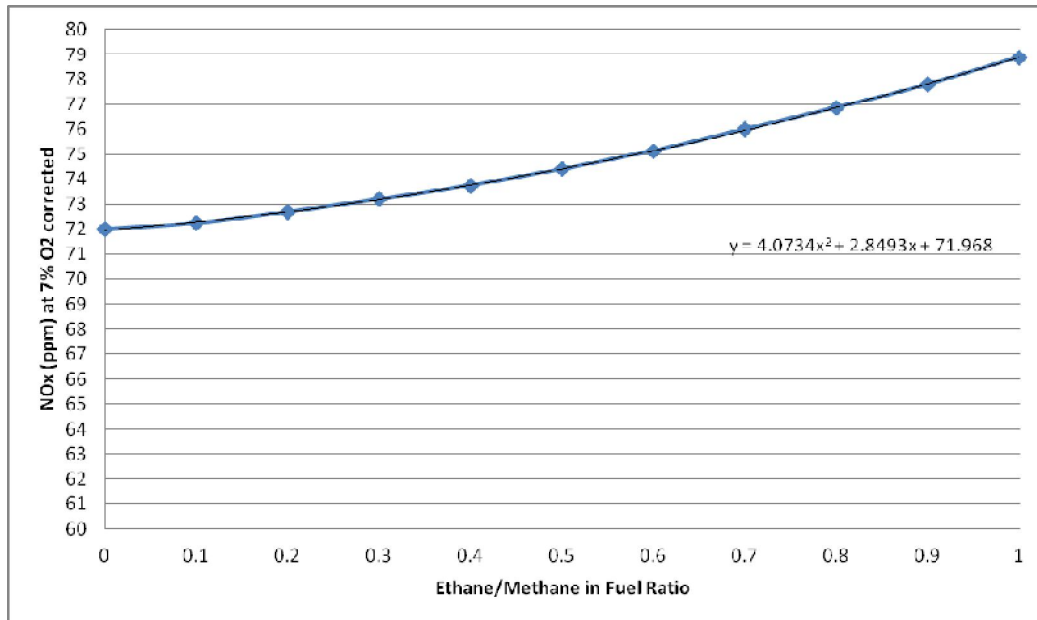
ภาพที่ 5.13 ผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศ ต่อปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์

อุณหภูมิของบรรยากาศมีผลกระทบอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบที่กำลังการผลิตที่เท่ากัน จากทฤษฎีจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คืออากาศที่ร้อนขึ้นจะทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลงเนื่องจากความหนาแน่นจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของการทำความเย็นให้กับเปลวเพลิงในห้องเผาไหม้ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน จากผลการคำนวณโดยแบบจำลองจะพบว่าเมื่อใดก็ตามที่อุณหภูมิของอากาศสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส และเดินเครื่องยนต์กักกันก๊าซเติมกำลังการผลิต ค่าไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์กักกันก๊าซก็จะสูงกว่าปริมาณที่ควบคุม หรือ 108 ppm ที่ 7% ออกซิเจน ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่สำคัญของการที่มีปริมาณการปลดปล่อยเกินกว่าค่าควบคุม

5.4. ผลกระทบจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ภายในโรงแยกก๊าซธรรมชาติ โดยปกติจะใช้ก๊าซธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการแยกก๊าซ (treated gas) ซึ่งจะมีองค์ประกอบหลักเป็นมีเทนมากกว่า 96% ที่เหลือจะเป็นก๊าซเฉื่อย ในช่วงที่ทำการเริ่มเดินเครื่อง มีความจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงชนิดของเชื้อเพลิงโดยใช้ก๊าซธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแยกก๊าซ (feed gas) แม้ว่าองค์ประกอบหลักยังคงเป็นมีเทน แต่ยังคงคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่เอเทนขึ้นไป (C₂₊) เป็น

องค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นมา องค์ประกอบเหล่านั้นมีผลกระทบต่อค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ใช้ในห้องเผาไหม้ลดลง จากค่าความร้อนที่สูงขึ้น ในงานวิจัย จะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของระหว่าง Ethane ต่อ Methane ตั้งแต่ 0 ถึง 1 เพื่อศึกษาผลกระทบของไนโตรเจนออกไซด์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจากเชื้อเพลิง



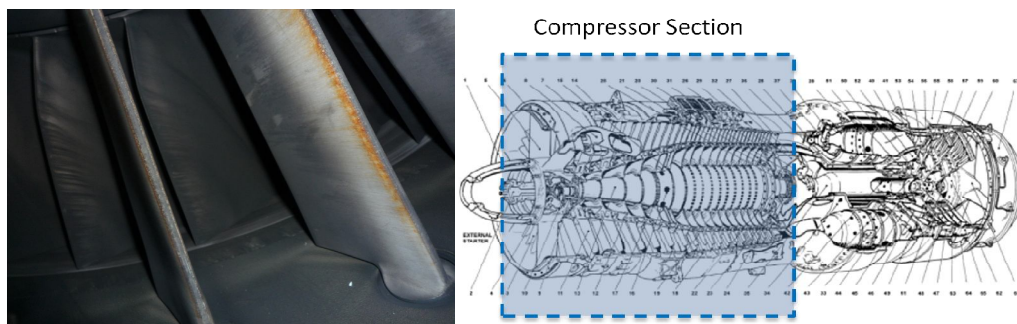
ภาพที่ 5.14 ผลกระทบของค่าความร้อนที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิงต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ระดับกำลังการผลิตเท่ากัน เครื่องยนต์จะต้องการพลังงานจากเชื้อเพลิงเท่ากัน ดังนั้นในกรณีที่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนน้อยลงเพื่อรักษาระดับพลังงานเท่ากัน เราจึงต้องเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงส่งผลกระทบต่อความเร็วการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีผลทำให้การผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงดีขึ้นเล็กน้อย ผลศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้จะพบว่า การเผาไหม้แบบ Diffusion หรือการเผาไหม้แบบที่เชื้อเพลิงและออกซิเจนจะก่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าการเผาไหม้แบบ Lean Pre-mixed เสมอ

5.5. ผลกระทบจากสมรรถนะของเครื่องยนต์

สมรรถนะของเครื่องยนต์กักเก็บก๊าซหมายถึงกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ต่อพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่จ่ายให้กับเครื่องยนต์ ปัจจัยที่จะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กักเก็บก๊าซมากที่สุดคือประสิทธิภาพเครื่องอัดอากาศภายในเครื่องยนต์กักเก็บก๊าซ ซึ่งสิ่งสกปรกขนาดเล็กหรือฝุ่นในอากาศที่ผ่านตัวกรองอากาศแล้วมาเกาะบริเวณใบพัดของเครื่องอัดอากาศ

สามารถทำให้สมรรถนะของเครื่องอัดอากาศลดลงได้อย่างเป็นนัยสำคัญ และปัจจัยรองที่จะกระทบต่อประสิทธิภาพคือสภาพของซีลภายในเครื่องยนต์ จำนวนชั่วโมงการทำงานและจำนวนครั้งในการหยุดเดินเครื่องจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ซีลสึกหรอจากผลของการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นส่วน ทำให้สูญเสียอากาศบางส่วนออกทางช่องว่างของซีล ทั้งหมดนี้เป็นผลทำให้ความดันของอากาศที่ถูกอัด (CDP) ลดลง ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของ CDP ที่ลดลง จากการที่ CDP ลดลง ปริมาณอากาศที่จะเข้าไปในห้องเผาไหม้ก็จะลดลง เป็นผลทำให้การลดอุณหภูมิของเปลวเพลิงด้วยอากาศลดลงตามลำดับ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กักทันก๊าซลดลง ผลกระทบจากสมรรถนะของเครื่องยนต์จะมีแนวโน้ม ในลักษณะเช่นเดียวกันกับภาพที่ 5.13



ภาพที่ 5.15 สิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ใบพัดของเครื่องอัดอากาศ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองทางกระบวนการผลิต Aspen HYSYS เพื่อหาเงื่อนไขขอบเขตรอบห้องเผาไหม้และโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล Ansys FLUENT เพื่อพัฒนาแบบจำลองห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซซึ่งใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอุตสาหกรรมโรงแยกก๊าซธรรมชาติ สำหรับใช้ในการทำนายปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในห้องเผาไหม้ แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากการทำนายอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากหลากหลายปัจจัย สรุปได้ว่ากำลังการผลิตหรือภาระงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ชนิดหรือองค์ประกอบของเชื้อเพลิง และสมรรถนะของเครื่องยนต์ เป็นปัจจัยที่กระทบต่อปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์อย่างยิ่ง ผลจากการศึกษาสามารถนำไปใช้ในเป็นแนวทางในการเดินเครื่องเพื่อที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ในการผลิต และควบคุมค่ามลภาวะที่เกิดขึ้นให้อยู่ในกรอบของกฎหมายสิ่งแวดล้อมของท้องถิ่น

6.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากสรุปผลการวิจัย แนวโน้มของปริมาณการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ จากปัจจัยสำคัญที่ทำการศึกษา จะสามารถอภิปรายในประเด็นปัญหาการที่ค่าไนโตรเจนออกไซด์ที่วัดบริเวณปลายปล่องของโรงผลิตไฟฟ้า มีการแกว่งจนเกินกว่าค่าควบคุมบ่อยครั้ง เนื่องจากในสถานะที่เครื่องยนต์ถูกใช้งานมาจนกระทั่งสมรรถนะของเครื่องยนต์ต่ำลงจากหลายปัจจัยเช่นสิ่งสกปรกในเครื่องอัดอากาศ การเสื่อมสภาพของซีล และการรั่วของลิ้นระบายแรงดันอากาศที่ถูกอัด ล้วนทำให้เครื่องยนต์จำเป็นต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงมากขึ้น จนทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ประกอบกับในสถานะที่โรงงานต้องการกำลังการผลิตสูง ผลกระทบเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ใกล้เคียงกับค่าควบคุมมาก ในขณะที่เดียวกันถ้าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่สูงขึ้น หรือวันที่อากาศร้อน ก็จะเป็นผลทำให้ค่าไนโตรเจนออกไซด์เกินกว่าค่าควบคุม ตามที่ตรวจสอบพบในประวัติของการเดินเครื่อง ดังนั้นเพื่อให้ค่าไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่าค่าควบคุม จนกระทั่งสามารถรองรับผลของปัจจัยเหล่านี้ ผู้ควบคุมเครื่องยนต์จำเป็นต้องตรวจสอบค่าสมรรถนะเพื่อกำหนดกลยุทธ์ในการขอยุติเครื่องจักรมาดำเนินการซ่อมบำรุงอย่างเป็นระบบ

6.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเท่านั้น ไอเสียของโรงผลิตไฟฟ้าไม่ได้ถูกทิ้งออกปล่อยโดยตรง แต่จะมีระบบ Waste Heat Recovery Unit ซึ่งนำความร้อนจากไอเสียมาถ่ายเทพลังงานให้กับน้ำมันร้อน แล้วนำพลังงานในน้ำมันร้อนจะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนภายในระบบหอกลั่นของกระบวนการแยกก๊าซซึ่งถ้าทำการศึกษาถึงปัจจัยดังกล่าวในมุมมองของการวิเคราะห์หาจุดที่เดินเครื่องแล้วมีต้นทุนต่อหน่วยการผลิตทั้งไฟฟ้าและพลังงานความร้อนที่ต่ำที่สุด ภายใต้ตัวแปรสมรรถนะของเครื่องยนต์ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้และอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ โดยกำหนดให้มีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์เป็นข้อจำกัดในการผลิต ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการกำหนดกลยุทธ์การผลิตอย่างยิ่ง

รายการอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน. แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย. [ออนไลน์]. 2552.
แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/power/pdp/> [18 ธันวาคม 2555]
- [2] Andrea Lazzaretto, Andrea Toffolo. Prediction of performance and emissions of a two-shaft gas turbine from experimental data. Applied Thermal Engineering 28 (December 2008) : 2405-2415.
- [3] A. Frassoldati, S. Frigerio, E. Colombo, F. Inzoli, T. Faravelli. Determination of NOx emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure. Chemical Engineering Science 60 (June 2005) : 2851–2869.
- [4] Louis Tsague, Joseph Tsogo, Thomas Tamo Tatietse. Prediction of the production of nitrogen oxide (NOx) in turbojet engine. Applied Thermal Engineering 40 (September 2006) : 5727–5733.
- [5] Melissa G. Michaud, Phillip R. Westmoreland, Alan S. Feitelberg. Chemical mechanisms of NOx formation for gas turbine conditions. Symposium (International) on Combustion 24 (1992) : 879–887.
- [6] H. Barths, N. Peters, N. Brehm, A. Mack, M. Pfitzner and V. Smiljanovski. Simulation of pollutant formation in a gas-turbine combustor using unsteady flamelets. Symposium (International) on Combustion 27 (1998) : 1841–1847.
- [7] Vincent Fichet, Mohamed Kanniche, Pierre Plion, Olivier Gicquel. A reactor network model for predicting NOx emissions in gas turbines. Fuel 89 (September 2010) : 2202–2210.
- [8] A.B. Lebedev, A.N. Secundov, A.M. Starik, N.S. Titova, A.M. Schepin. Modeling study of gas-turbine combustor emission. Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) : 2941–2947.
- [9] C.Y. TerMaath, E.G. Skolnik, R.W. Schefer, J.O. Kellerb. Emissions reduction benefits from hydrogen addition to midsize gas turbine feedstocks. International Journal of Hydrogen Energy 31 (August 2006) : 1147-1158.
- [10] Shigeru Hayashi, Hideshi Yamada, Mitsumasa Makida. Extending low-NOx operating range of a lean premixed–prevaporized gas turbine combustor by reaction of secondary mixtures injected into primary stage burned gas. Proceedings of the Combustion Institute 30 (January 2005) : 2903–2911.

- [11] M. Missaghi. Mathematical Modelling of Chemical Sources in Turbulent Combustion. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Leeds, 1987.
- [12] R. K. Hanson and S. Salimian. Survey of Rate Constants in H/N/O Systems. Combustion Chemistry (1984) : 361.
- [13] A. A. Westenberg. Kinetics of decay of hydroxyl radicals at low pressure. Comb. Sci. Tech. 4 (1971) : 3224.
- [14] C. Westbrook and F. Dryer. Chemical Kinetic Modelling of Hydrocarbon Combustion. Prog. Energy Comb. Sci. (1984) : 1.
- [15] G. G. De Soete. Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen. The Combustion Institute 15 (1975) : 1093-1102.
- [16] P. C. Melte and D. T. Pratt. Measurement of Atomic Oxygen and Nitrogen Oxides in Jet Stirred Combustion. The Combustion Institute (1974) : 1061-1070.
- [17] W. P. Jones and J. H. Whitelaw. Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review. Combustion and Flame 48 (1982) : 1-26.
- [18] D. G. Nicol, P. C. Malte, A. J. Hamer, R. J. Roby and R. C. Steele. Development of a Five-Step Global Methane Oxidation-NO Formation Mechanism for Lean-Premixed Gas Turbine Combustion. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 121 (April 1999) : 272-280.
- [19] Igor V. Novoselov and Philip C. Malte. Development and Application of an Eight-Step Global Mechanism for CFD and CRN Simulations of Lean-Premixed Combustors. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 130 (January 2008) : 502-510.
- [20] CFD Online. Turbulent Intensity [Online]. 2012. Available from : http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity [2013, April 20]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - ชื่อสกุล	ณัฐชนน ไชยประเสริฐ
วัน เดือน ปี เกิด	8 มี.ค. 2525
ที่อยู่ปัจจุบัน	248 ซ.ร่มเกล้า19/1 แขวงคลองสามประเวศ เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) รัฐวิสาหกิจภายใต้การกำกับดูแลของ กระทรวงพลังงาน
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ7 (เทียบเท่าข้าราชการระดับ 5)
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2555	ส่วนบริหารแผนงานบำรุงรักษา บ.ปตท.จำกัด (มหาชน)
พ.ศ. 2550	ส่วนบำรุงรักษาเครื่องกล บ.ปตท.จำกัด (มหาชน)
พ.ศ. 2547	ส่วนวิศวกรรม บ.ปตท.จำกัด (มหาชน)
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2546	วศบ. (วิศวกรรมเครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผลงานตีพิมพ์	
	ชื่อบทความ Prediction of Nitrogen Oxide Generated from Gas Turbine Engine
	ชื่อการประชุม Pure and Applied Chemistry International Conference 2013
	ปีที่ตีพิมพ์ 2556 หน้า 361-364 ประเทศไทย