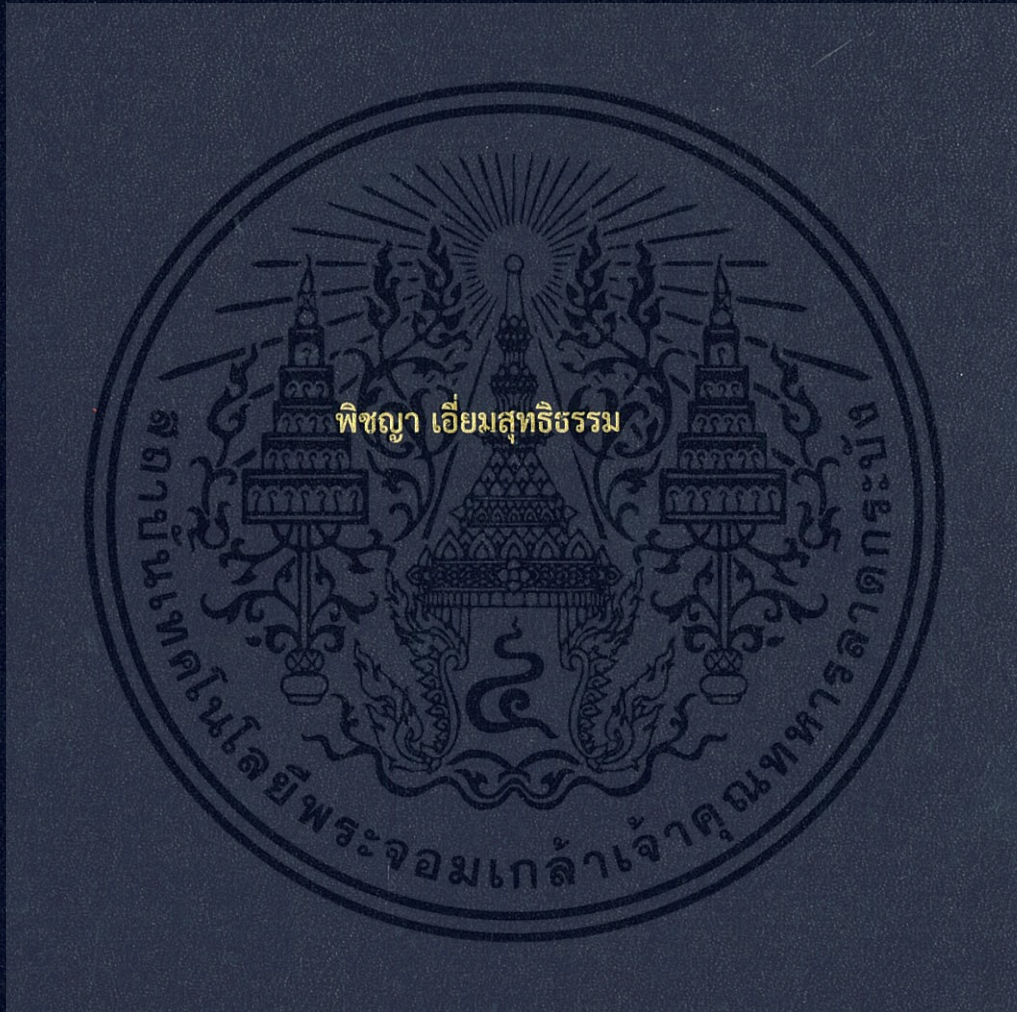


การสร้างแบบจำลองการเกิดโคกในเตาเผาน้ำมันดิบ  
และศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโคกออกจากเตาเผา



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การสร้างแบบจำลองการเกิดโค้กในเตาเผาถ่านหินดิบ  
และศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโค้กออกจากเตาเผา



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODELING AND OPTIMIZATION OF COKE FORMATION  
IN CRUDE OIL FURNACE



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2017

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การสร้างแบบจำลองการเกิดไค้กในเตาเผา น้ำมันดิบและศึกษาเวลาที่  
เหมาะสมในการกำจัดไค้กออกจากเตาเผา  
โดย นางสาวพิชญา เอี่ยมสุทธิธรรม รหัสนักศึกษา 57010891  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา  
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง	การสร้างแบบจำลองการเกิดไค้กในเตาเผา น้ำมันดิบและศึกษาเวลาที่ เหมาะสมในการกำจัดไค้กออกจากเตาเผา
โดย	นางสาวพิชญา เอี่ยมสุทธิธรรม
รหัสนักศึกษา	57010891
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา

### บทคัดย่อ

เตาเผา น้ำมันดิบเป็นส่วนที่มีความสำคัญในหน่วยการกลั่น น้ำมันดิบของโรงกลั่นปิโตรเลียมเตาเผาที่มีหน้าที่ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบก่อนเข้าสู่หอกลั่น โดยปัญหาที่มักจะทำให้เกิดกับเตาเผา คือการเกิดไค้กเคลือบที่ผนังด้านในท่อซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตต่อไป จึงต้องมีการกำจัดไค้กภายในท่ออยู่เสมอ ซึ่งในการกำจัดไค้กแต่ละครั้งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายและสูญเสียรายได้จากการหยุดกระบวนการผลิต แต่หากไม่กำจัดไค้กจะทำให้เกิดไค้กเคลือบที่ผนังท่อในปริมาณมาก ส่งผลให้ต้องใช้เชื้อเพลิงในการให้ความร้อนมาก ดังนั้น จึงต้องกำจัดไค้กในเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด การศึกษาในงานวิจัยนี้มีการสร้างแบบจำลองสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation : ODE) ของเตาเผา น้ำมันดิบ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการเกิดไค้ก และการถ่ายเทความร้อนเพื่อคำนวณเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไค้ก โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการพาความร้อน และ ส่วนการแผ่รังสีความร้อน ในส่วนการพาความร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของแก๊ส ในส่วนการแผ่รังสีความร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันกับในส่วนการพาความร้อน แต่จะมีการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟด้วยร่วมด้วย จากนั้นใช้ฟังก์ชัน ode15s ในโปรแกรม MATLAB มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา แบบจำลองที่ได้จะแสดงอัตราการการเคลือบของไค้กในผนังท่อรวมทั้งปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายร่วมกับค่ากำจัดไค้กและรายได้ที่สูญเสียจากการหยุดกระบวนการผลิต เพื่อหาเวลาในการกำจัดไค้กที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากเวลาที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด

จากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดไค้กและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีปริมาณเพิ่มขึ้นในลักษณะ S-curve ซึ่งตรงกับอัตราการเพิ่มขึ้นของตะกรันทั่วไป โดยสามารถอธิบายการเกิดไค้กได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเดือนที่ 0-3 เป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดไค้กต่ำ เนื่องจากไค้กที่เกิดขึ้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันดิบและองค์ประกอบของผนังท่อซึ่งมีค่าคงที่อัตราต่ำ ช่วงเดือนที่ 3-7 เป็นช่วงที่อัตราการเกิดไค้กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันดิบและไค้กซึ่งมีค่าคงที่อัตราสูง และช่วงตั้งแต่เดือนที่ 7 เป็นต้นไป เป็นช่วงที่อัตราการเกิดไค้กลดลงเนื่องจากความหนาไค้กที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นที่ในการทำปฏิกิริยาลดลง เมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไค้ก พบว่าที่ระยะเวลา 7 เดือนเป็นระยะเวลาที่จะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายรายปีต่ำที่สุด คิดเป็นเงิน 2.75 หมื่นล้านบาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report title	Modeling and Optimization of Coke Formation in Crude Oil Furnace
By	Miss Pitchaya Eiamsuttitam
Student ID.	57010891
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Academic year	2017
Advisor	Dr. Amata Anatpinijwatna

## ABSTRACT

Crude oil furnace is an integral part of a crude oil distillation unit (CDU) in the petroleum refinery industry, it's used to heat crude oil before entering the distillation column. Problem associated with the furnace is the coke deposition inside the furnace tubes which affects the operation. For this reason, furnace decoking is needed which cost cleaning cost and revenue loss. In case of no decoking operation, coke will deposit inside and more fuel consumption is required. Therefore, furnace decoking should be operated in the appropriate time to minimize all cost. In this study, an ordinary differential equation (ODE) model of the furnace has been formulated to study the mechanisms of the coke formation and heat transfer to optimize a decoking operation. The calculation boundaries are divided into 2 sections, convection and radiation sections. There are heat transfers by gas convection and gas radiation in convection section. And in radiation section, heat is transferred by gas convection, gas radiation and flame radiation. Then, ode15s embed in MATLAB has been applied to solve the model. The model illustrates the rate of the coke formation and deposition on the furnace wall and also provides fuel consumption of the furnace. Then, the modeling result is used for optimization of decoking time.

The result of this study shows that rate of coke formation and rate of fuel consumption are increase in form of S-curve corresponding to general fouling curve. The result curves can be expressed in 3 stages. At first 3 month, all reaction is occur by react crude oil with tube wall which has very low rate of reaction. At 3<sup>rd</sup>-7<sup>th</sup> month, rate of coke formation is higher than the first stage as a result of reaction between crude oil and coke which has high reaction rate. The last stage, from 7<sup>th</sup> month onwards, rate of coke formation is decrease according to the increasing of coke thickness which leads to the reducing of reaction area. The optimization of decoking time shows that the furnace should be cleaned in the 7<sup>th</sup> month which cost about 27.5 billion baht per year.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาในการทำงานวิจัยนี้ ด้วยดีตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในด้านวิชาการ คำปรึกษา และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุพการี ครอบครัว และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ช่วยอบรมสั่งสอนและเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน

สำหรับคุณงานความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใดในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำโครงการวิจัยขอน้อมรับและขอภัยไว้ ณ ที่นี้



พิชญา เอี่ยมสุทธิธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา [คลิก](#) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สัญลักษณ์

$A_{\text{tube},i}$	พื้นที่ผิวของผนังท่อด้านใน (m)
$A_{\text{tube},o}$	พื้นที่ผิวของผนังท่อด้านนอก (m)
$C_{a1}$	พื้นที่ของไค้กในขณะที่ยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาเหลืออยู่ (m)
$C_{a2}$	พื้นที่ของไค้กในขณะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาหมด (m)
cat	พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา (m)
$C_m$	ความเข้มข้นขององค์ประกอบ m (mol/lit)
$C_p$	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันดิบ (kJ/kg·K)
$h_{\text{crude oil,conv}}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมันดิบส่วนการพาความร้อน (W/m <sup>2</sup> ·K)
$h_{\text{crude oil,r}}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมันดิบส่วนการแผ่รังสีความร้อน (W/m <sup>2</sup> ·K)
$k_1$	ค่าคงที่อัตรา (s <sup>-1</sup> )
$k_{\text{coke}}$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไค้ก (W/m <sup>2</sup> ·K)
$k_r$	ค่าคงที่อัตรา (s <sup>-1</sup> )
$k_{\text{tube,conv}}$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อส่วนการพาความร้อน (W/m <sup>2</sup> ·K)
$k_{\text{tube,r}}$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อส่วนการแผ่รังสีความร้อน (W/m <sup>2</sup> ·K)
$L_d$	ระยะที่ไค้กเคลื่อนผนังท่อ (m)
$L_{\text{tube}}$	ความยาวท่อ (m)
$m_{\text{crude oil}}$	อัตราการไหลของน้ำมันดิบ (kg/s)
$MW_m$	น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบ m (g/mol)
$Q_{\text{conv}}$	อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนการพาความร้อน (Watt)
$Q_{\text{crude oil,conv}}$	อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันดิบส่วนการพาความร้อน (Watt)
$Q_{\text{crude oil,r}}$	อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันดิบส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Watt)
$Q_{\text{rad}}$	อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Watt)
$r_m$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบ m (mol/m <sup>3</sup> s)
$r_{\text{tube},i}$	รัศมีท่อใน (m)
$r_{\text{tube},o}$	รัศมีท่อนอก (m)
t	เวลา (month)
$T_{\text{coke},i}$	อุณหภูมิไค้กส่วนแผ่รังสีความร้อน (K)
$T_{\text{coke},i,conv}$	อุณหภูมิไค้กส่วนพาความร้อน (K)
$T_{\text{crude,o,conv}}$	อุณหภูมิน้ำมันดิบขาออกส่วนการพาความร้อน (K)
$T_{\text{crude,o,r}}$	อุณหภูมิน้ำมันดิบขาออกส่วนการแผ่รังสีความร้อน (K)
$T_{\text{crude,i,conv}}$	อุณหภูมิน้ำมันดิบขาเข้าส่วนการพาความร้อน (K)
$T_{\text{crude,i,r}}$	อุณหภูมิน้ำมันดิบขาเข้าส่วนการแผ่รังสีความร้อน (K)
$T_{\text{tube},i,conv}$	อุณหภูมิผนังท่อด้านนอกส่วนการพาความร้อน (K)
$T_{\text{tube},i,r}$	อุณหภูมิผนังท่อด้านนอกส่วนการแผ่รังสีความร้อน (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_{\text{tube,o,conv}}$	อุณหภูมิผนังท่อด้านในส่วนการพาความร้อน (K)
$T_{\text{tube,o,r}}$	อุณหภูมิผนังท่อด้านในส่วนการแผ่รังสีความร้อน (K)
$V_c$	ปริมาตรโค้ก ( $\text{m}^3$ )
$V_{\text{furnace,conv}}$	ปริมาตรเตาเผาส่วนการพาความร้อน ( $\text{m}^3$ )
$V_{\text{furnace,r}}$	ปริมาตรเตาเผาส่วนการแผ่รังสีความร้อน ( $\text{m}^3$ )
$X_c$	ความหนาโค้กเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาหมด (m)
$X_{\text{coke,conv}}$	ความหนาโค้กในส่วนการพาความร้อน (m)
$X_{\text{coke,r}}$	ความหนาโค้กในส่วนการแผ่รังสีความร้อน (m)
$\Delta X_{\text{tube}}$	ความหนาท่อ (m)
$\rho_{\text{coke}}$	ความหนาแน่นโค้ก ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สัญลักษณ์.....	IV
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ระเบียบวิธีการสร้างแบบจำลอง.....	3
2.2 โครงสร้างของเตาเผาน้ำมันดิบ.....	5
2.3 การถ่ายเทความร้อน.....	6
2.4 องค์ประกอบของน้ำมันดิบ.....	7
2.5 กลไกการเกิดโค้ก.....	9
2.6 วิธีกำจัดโค้ก.....	11
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	12
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	12
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน.....	21
4.1 ผลการสร้างแบบจำลอง.....	21
4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	22
4.3 ผลการคำนวณเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโค้ก.....	23
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	26
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	26
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	26
เอกสารอ้างอิง.....	27

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	28
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง.....	29
ภาคผนวก ข การเขียน Code ในโปรแกรม MATLAB.....	31
ภาคผนวก ค ข้อมูลสำหรับสร้างกราฟระหว่างความหนาได้กและเวลา.....	38
ภาคผนวก ง การคำนวณเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไค้ก.....	40



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำมันดิบแบ่งตามอุณหภูมิจุดตัดของจุดเดือด.....	7
3.1 ข้อมูลของเตาเผา้ำมันดิบ.....	13
3.2 สภาวะดำเนินงาน.....	13
3.3 เมทริกซ์สามแนวเฉียงสำหรับการคำนวณในส่วนการแผ่รังสีความร้อน.....	19
3.4 เมทริกซ์สามแนวเฉียงสำหรับการคำนวณในส่วนการพาความร้อน.....	20
ก.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองส่วนการแผ่รังสีความร้อน.....	29
ก.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองส่วนการพาความร้อน.....	29
ก.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการ Optimization.....	30
ค.1 ความหนาโค้กในส่วนการพาความร้อน.....	38
ง.1 ค่าในการคำนวณเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโค้ก.....	40



# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง.....	3
2.2 เตาเผา น้ำมันดิบชนิด Cabin furnace.....	5
2.3 กราฟ TBP ของน้ำมันดิบจากประเทศซาอุดีอาระเบีย.....	8
2.4 กราฟ API ของน้ำมันดิบจากประเทศซาอุดีอาระเบีย.....	8
2.5 ขั้นตอนการเกิดเส้นใยโค้กจากตัวเร่งปฏิกิริยา.....	9
2.6 การเพิ่มขึ้นของโค้กจากการควบแน่น.....	10
2.7 ขั้นตอนการเกิดโค้กจากอนุมูลอิสระ.....	10
2.8 อุปกรณ์ Pig .....	11.
3.1 เตาเผา น้ำมันดิบ.....	12
3.2 ลักษณะของท่อในเตาเผา น้ำมันดิบ.....	13
3.3 ลักษณะของท่อและทิศทางการไหลของน้ำมันดิบภายในเตาเผา.....	14
4.1 ผลการจำลองอัตราการเพิ่มขึ้นของโค้กในส่วนการพาความร้อนและอัตราการใช้เชื้อเพลิง.....	21
4.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของโค้กเมื่อน้ำมันดิบที่เข้ามามี 5 องค์ประกอบ.....	22
4.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของโค้กเมื่อน้ำมันดิบที่เข้ามาไม่มีกากน้ำมันเป็นองค์ประกอบ.....	23
4.4 ค่าเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ต่อปีในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่แตกต่างกัน.....	24
4.5 ค่าทำความสะอาดและรายได้ที่สูญเสียต่อปีในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่แตกต่างกัน.....	24
4.6 ค่าใช้จ่ายและรายได้ที่สูญเสียทั้งหมดในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่แตกต่างกัน.....	24
4.7 ภาพขยายค่าใช้จ่ายและรายได้ที่สูญเสียทั้งหมดในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่เดือนที่ 4 -10.....	25

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เตาเผา น้ำมันดิบ (Crude oil furnace) เป็นหน่วยให้ความร้อนที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการกลั่น หน้าที่หลักคือให้ความร้อนที่กับน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการกลั่นเพื่อแยกน้ำมันดิบออกเป็นองค์ประกอบต่างๆ โดยความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำมันดิบเกิดจากการเผาเชื้อเพลิง เช่น แก๊สธรรมชาติ ปัญหาหลักที่พบมากในเตาเผา น้ำมันดิบคือการเกิดโค้กเคลือบที่ผนังด้านในของท่อ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก ดังตัวอย่างที่ได้กล่าวไว้ในงานวิจัยของ J. Towfighi และคณะ[1] เช่น ชัดขวางการไหลของน้ำมันดิบภายในท่อ ส่งผลให้เกิดความตันลด ท่อ ถูกกัดกร่อนจากปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลง เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูงขึ้น เพราะต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณมากขึ้นเพื่อให้ น้ำมันดิบมีอุณหภูมิที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการหยุดการทำงานของเตาเผา น้ำมันดิบเป็นระยะเพื่อทำความสะอาดท่อ ซึ่งจะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดโค้กออก และสูญเสียรายได้จากการหยุดการทำงาน การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหลักการเกิดโค้กภายในเตาเผา เพื่อสร้างแบบจำลองของการเกิดโค้กภายในเตาเผา และหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโค้ก

ในการทำแบบจำลองการเกิดโค้กภายในเตาเผาจะเป็นประโยชน์ต่อการทำนายเวลาที่ เหมาะสมในการกำจัดโค้ก ที่จะทำให้สูญเสียรายได้ที่น้อยที่สุด เนื่องจากหากหยุดการทำงานเพื่อกำจัดโค้กในขณะที่โค้กยังมีปริมาณน้อยเกินไป จะต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดและสูญเสียรายได้จากการผลิตมาก แต่หากไม่กำจัดโค้กหรือกำจัดขณะที่มีปริมาณโค้กสะสมในท่อเป็นจำนวนมาก จะต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายมากเช่นกัน เนื่องจากต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนมาก

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาหลักการเกิดโค้กและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา น้ำมันดิบ
- 1.2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดโค้กภายในเตาเผา น้ำมันดิบ
- 1.2.3 ทำนายเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโค้กของเตาเผา น้ำมันดิบ

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนแก่เตาเผา น้ำมันดิบเมื่อมีโค้กเกิดขึ้นที่ ณ เวลาใดๆ โดยการเกิดโค้กนี้ไม่คำนึงถึงทิศทางและระยะทางของการไหล

1.3.2 ใช้แบบจำลองในการคำนวณหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหยุดการทำงานของเตาเผา น้ำมันดิบ เพื่อกำจัดโค้กที่สะสมที่ผนังท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจกลไกการเกิดไค้กและการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาน้ำมันดิบ

1.4.2 สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหยุดการทำงานของเตาเผา น้ำมันดิบ เพื่อกำจัดไค้กที่สะสมที่ผนังท่อ

1.4.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานวิจัยอื่นๆ



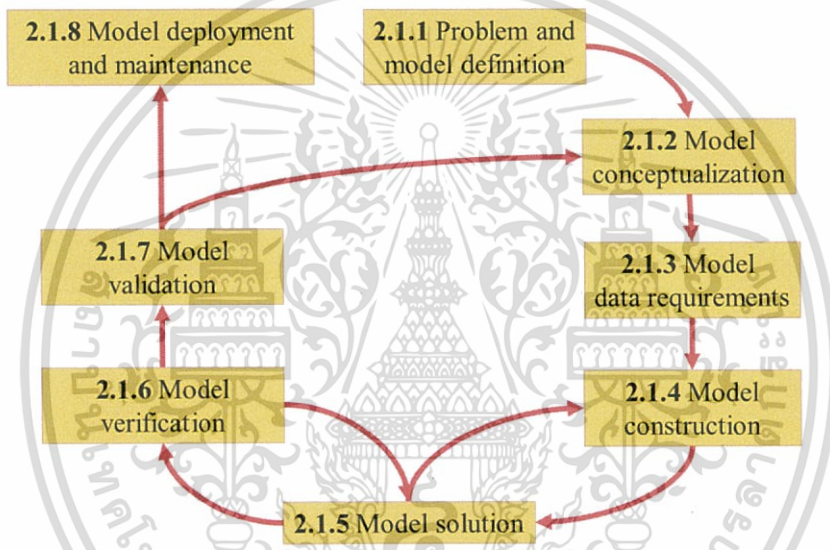
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้พูดถึงทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรงงานนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยระเบียบวิธีการสร้างแบบจำลอง โครงสร้างของเตาเผา น้ำมันดิบ การถ่ายเทความร้อน องค์ประกอบของน้ำมันดิบ และกลไกการเกิดโค้ก

### 2.1 ระเบียบวิธีการสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องดำเนินการตามวิธีขั้นตอนเพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมและถูกต้องตรงตามวัตถุประสงค์ โดย I. Cameron และ คณะ[2] ได้เสนอระเบียบวิธีการสร้างแบบจำลองไว้ 8 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆดังนี้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง

#### 2.1.1 การกำหนดปัญหาและแบบจำลอง

ปัญหาที่ยังคงเป็นปัญหาหลักในอุตสาหกรรม เช่น การประเมินทางการเงินและการประเมินความเป็นไปได้ การสร้างข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการ การทำให้กระบวนการผลิตมีความคุ้มค่าที่สุด ปัญหาการจัดการความเสี่ยง เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบปัญหาอื่นๆ เช่น ช่วยในการตัดสินใจด้านการวางแผนกลยุทธ์ทางการค้า และการประเมินปัจจัยมนุษย์ เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องนำมาอภิปรายในด้านต่างๆเพื่อช่วยในการกำหนดขอบเขตและทิศทางในการแก้ปัญหาให้บรรลุเป้าหมาย เช่น ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองควรที่จะนำไปสู่การตัดสินใจแบบใด ใครเป็นผู้ตัดสินใจ เกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ใดที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลอง เป็นต้น

#### 2.1.2 แนวคิดของแบบจำลอง

การเข้าใจในแบบจำลองเป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในการสร้างแบบจำลอง ตัวอย่างสิ่งที่ควรคำนึงถึงในขั้นตอนนี้ เช่น ขอบเขตทั้งหมดของระบบที่กำลังศึกษา ข้อจำกัดที่สามารถระบุได้ในระบบซึ่งอาจจะรวมถึงข้อจำกัดในการดำเนินงานในสถานะต่างๆของระบบหรือข้อจำกัดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ เป็นต้น ความเข้าใจเหล่านี้จะเป็นการสร้างแนวคิดขั้นต้นของแบบจำลอง โดยลูกค้า บุคคลที่มีความคุ้นเคยกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์ กลุ่มผู้สร้างแบบจำลอง ผู้สร้างแบบจำลอง จะต้องร่วมกันในการสร้างแนวคิดขั้นต้นนี้ ซึ่งมีความสำคัญมากเพราะจะนำไปสู่ปัญหาที่ง่ายขึ้น ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองขึ้นได้ภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา ค่าใช้จ่าย และผลลัพธ์

### 2.1.3 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ประเภทของข้อมูลที่ควรพิจารณาเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาของการพัฒนาแบบจำลองขั้นต้น เช่น คุณสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมไดนามิกส์ของสารภายในระบบ ข้อมูลสมดุลวัฏภาค ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น ในกรณีที่เป็นสินค้าใหม่หรือกระบวนการที่กำลังผลิต อาจจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการทดลองในการทำนายพารามิเตอร์ต่างๆด้วย

### 2.1.4 การสร้างแบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้ต้องเข้าใจเป้าหมาย ร่วมกับแนวคิดของแบบจำลอง และสร้างแบบจำลองที่รวบรวมทั้งแนวคิดและเป้าหมายที่ต้องการนำไปใช้ขึ้นมา จากการสำรวจพบว่าเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ MS Excel, Commercial Flowsheeting Packages, MATLAB, Computational Fluid Dynamics (CFD) และ การเขียนโค้ดโดยตรง การเลือกเครื่องมือเหล่านี้ขึ้นอยู่กับนำไปใช้ที่แตกต่างกัน

### 2.1.5 วิธีการแก้ปัญหาของแบบจำลอง

การแก้ปัญหด้วยแบบจำลองส่วนใหญ่จะแก้ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลข ซึ่งวิธีเหล่านั้นจะแปรผันไปตามความสัมพันธ์ของสมการ เช่น สมการพีชคณิต (Algebraic equation systems : AEs) สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equations : ODEs) สมการพีชคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential-algebraic equations : DAEs) เป็นต้น แต่ละสมการจะแสดงถึงระบบชนิดต่างๆ ซึ่งจะใช้เครื่องมือในการแก้ปัญหที่แตกต่างกัน

### 2.1.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

คือการตรวจสอบการดำเนินงานของแบบจำลองผ่านแนวคิด หรือจุดเริ่มต้นของแบบจำลองว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการแสดงถึงแนวคิดที่ตั้งไว้หรือไม่ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงสองสิ่งในการตรวจสอบความถูกต้อง ได้แก่ ข้อผิดพลาดในการดำเนินงานทางแนวคิด และ ข้อผิดพลาดจากการเขียนโค้ด จำพวกเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ หรือตัวแปรต่างๆ

### 2.1.7 การตรวจสอบการนำไปใช้ของแบบจำลอง

เป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองสามารถแสดงถึงระบบที่มีอยู่ได้อย่างสมเหตุสมผลหรือไม่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น การตั้งสมมุติฐาน ข้อมูลที่ส่งเข้าไป (input) และสิ่งที่รับจวนระบบ ข้อมูลที่ส่งออก (output) มาของแบบจำลองและความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ส่งออกมาที่ระบบจริง ข้อมูลที่ใช้ เป็นต้น ในกรณีที่ไม่มีระบบที่ใช้อยู่จริงจะต้องทดสอบแบบจำลองและข้อมูลที่ส่งออกมา ที่ได้จากข้อมูลที่ส่งเข้าไปทั้งหมดเพื่อพิจารณาเกี่ยวกับการนำแบบจำลองไปใช้ ส่วนในกรณีที่มีระบบอยู่จริง จะต้องเก็บข้อมูลมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ที่สัมพันธ์กับการใช้แบบจำลอง หลังจากตรวจสอบการนำไปใช้แบบจำลองแล้ว ถ้าหากไม่ผ่าน จะต้องย้อนกลับไปสู่แนวคิดและโครงสร้างของปัญหา โดยพิจารณาอย่างระมัดระวังในด้านการตั้งสมมุติฐานและแนวคิดของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีเกส จำกัด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.8 การจัดการและซ่อมบำรุงแบบจำลอง

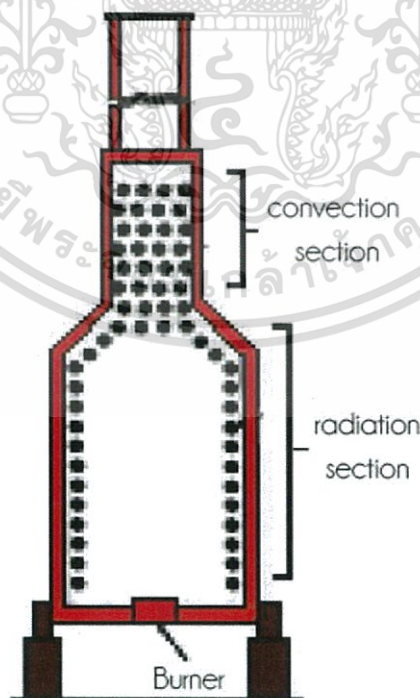
ในขั้นตอนนี้คือการจัดการข้อมูลในแบบจำลองให้สามารถเข้าใจง่าย เพื่อป้องกันการทำงานซ้ำซ้อน โดยการแบ่งแยกแบบจำลองให้เป็นสัดส่วนที่ชัดเจนตามขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง ต้องแน่ใจว่ามีการแสดงสมมุติฐานและการให้เหตุผลที่ชัดเจนในแบบจำลอง เป็นต้น

## 2.2 โครงสร้างของเตาเผาน้ำมันดิบ

จากงานวิจัยของ A. Chaibakhsh และคณะ [3] กล่าวว่า เตาเผา น้ำมันดิบเป็นหน่วยปฏิบัติการหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและเป็นหน่วยที่ใช้พลังงานมากที่สุดในโรงกลั่นน้ำมัน คิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโครงการนี้จะพิจารณาจากเตาเผาชนิด Cabin furnace ซึ่งเป็นเตาเผาที่นิยมใช้ในการให้ความร้อนกับน้ำมันดิบ โดยจะแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนการพาความร้อนและส่วนการแผ่รังสีความร้อน ดังรูปที่ 2.2

ภายในเตาเผา น้ำมันดิบจะประกอบไปด้วยเครื่องเผา 5 เครื่องอยู่ที่ด้านล่างของเตาเผา เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ทุกส่วนในเตาเผา น้ำมันดิบจะเข้าสู่เตาเผาจากทางด้านบนสู่ส่วนการพาความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 504.15 เคลวิน เป็น 561.65 เคลวิน ในส่วนนี้จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนจากแก๊สสู่ผนังท่อ และเกิดการแผ่รังสีความร้อนบางส่วน เนื่องจากแก๊สที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิสูง โดยน้ำมันดิบจะยังคงอยู่ในวัฏภาคของเหลว หลังจากนั้นน้ำมันดิบจะไหลเข้าสู่ส่วนของการแผ่รังสีความร้อน บางส่วนจะเริ่มกลายเป็นไอและอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นถึง 635 เคลวิน ในส่วนนี้จะเกิดทั้งการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากแก๊สสู่ผนังท่อเช่นเดียวกับในส่วนการพาความร้อน รวมทั้งยังเกิดการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟสู่ผนังท่อด้วย



รูปที่ 2.2 เตาเผา น้ำมันดิบชนิด Cabin furnace [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การถ่ายเทความร้อน

แหล่งความร้อนของเตาเผา น้ำมันดิบคือเปลวไฟและแก๊สที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิง เช่น แก๊สธรรมชาติ ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนสู่ผนังท่อ และ น้ำมันดิบต่อไป การถ่ายเทความร้อนสามารถจำแนกได้ 3 วิธี คือ การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี [5] แต่ละวิธีจะมีหลักการดังนี้

### 2.3.1 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ

การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ เป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานมากกว่าไปสู่อนุภาคข้างเคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า สามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลวและแก๊ส อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำจะขึ้นอยู่กับลักษณะต่างๆของตัวกลาง ได้แก่ ความหนา วัสดุของตัวกลาง รวมถึงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในตัวกลาง ตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ดังสมการที่ 2.1

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad 2.1$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน  
 $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน  
 $\frac{dT}{dx}$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

### 2.3.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา เป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของเหลวหรือแก๊สข้างเคียงที่กำลังเคลื่อนที่ ยิ่งของไหลเคลื่อนที่เร็ว อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจะยิ่งมากขึ้น ในกรณีที่ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งและของไหลจะเกิดขึ้นเพียงการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเท่านั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ และสามารถอธิบายด้วยกฎของนิวตัน (Newton's law) ดังสมการที่ 2.2

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad 2.2$$

เมื่อ  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  
 $A$  คือ พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน  
 $T_s$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิวของแข็ง  
 $T_\infty$  คือ อุณหภูมิของของไหล

### 2.3.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี

การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี คือพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ โฟตอน อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนภายในอะตอมหรือโมเลกุล การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีนี้แตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำและการพา เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการถ่ายเทรูปแบบนี้เป็นการถ่ายที่ความร้อนที่เร็วที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(มีความเร็วเท่าความเร็วแสง) อัตราการปลดปล่อยพลังงานที่มากที่สุดสามารถคำนวณได้จากกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann law) ดังสมการที่ 2.3

$$Q = \sigma AT^4 \quad 2.3$$

โดยสมการนี้แสดงถึงการปลดปล่อยพลังงานในอุดมคติ คือการปลดปล่อยพลังงานจาก วัตถุดำ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าการปลดปล่อยพลังงานจากวัตถุจริง อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีของวัตถุจริง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$Q = \varepsilon \sigma AT^4 \quad 2.4$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิว  
 $\sigma$  คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มานน์ มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$   
 $A$  คือ พื้นที่ผิวในการแผ่รังสีความร้อน  
 $T$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิว

## 2.4 องค์ประกอบของน้ำมันดิบ

เนื่องจากน้ำมันดิบแต่ละแหล่งจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จากรายงานสถิติการนำเข้า-ส่งออก น้ำมันดิบในประเทศไทยของกรมศุลกากร [6] พบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าน้ำมันดิบจากประเทศซาอุดีอาระเบียมากเป็นอันดับต้นๆ ในโครงการฉบับนี้จึงใช้องค์ประกอบของน้ำมันดิบจากประเทศซาอุดีอาระเบียในการคำนวณ ซึ่งองค์ประกอบของน้ำมันดิบแบ่งตามอุณหภูมิจุดตัดของจุดเดือดจริง ได้ถูกรายงานไว้ในบันทึกการบรรยายของ R. Uppaluri [7] ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ จะส่งผลต่ออัตราการเกิดโค้กที่แตกต่างกัน

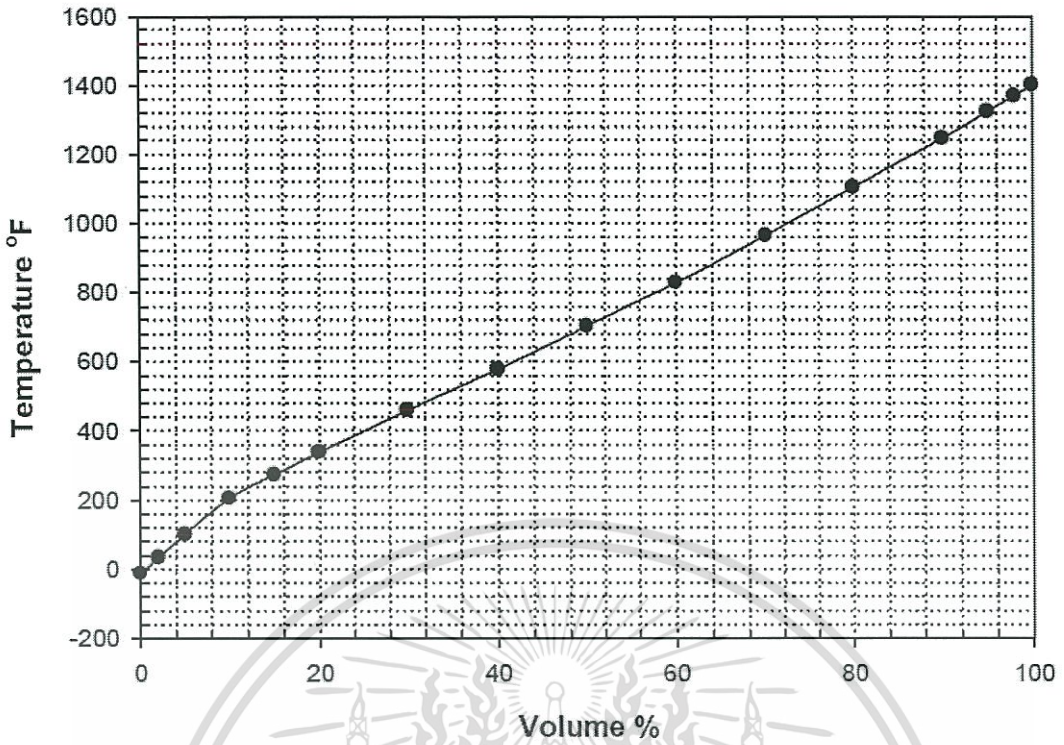
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำมันดิบแบ่งตามอุณหภูมิจุดตัดของจุดเดือด

องค์ประกอบของน้ำมันดิบ	อุณหภูมิจุดตัดของจุดเดือด
แนฟทา (Naphtha)	แก๊ส - 463.71 เคลวิน
เคโรซีน (Kerosene)	463.71 - 552.04 เคลวิน
แก๊สออยล์เบา (Light Gas Oil : LGO)	552.04 - 594.26 เคลวิน
แก๊สออยล์หนัก (Heavy Gas Oil : HGO)	594.26 - 633.15 เคลวิน
กากน้ำมัน (Residue)	633.15 เคลวิน ขึ้นไป

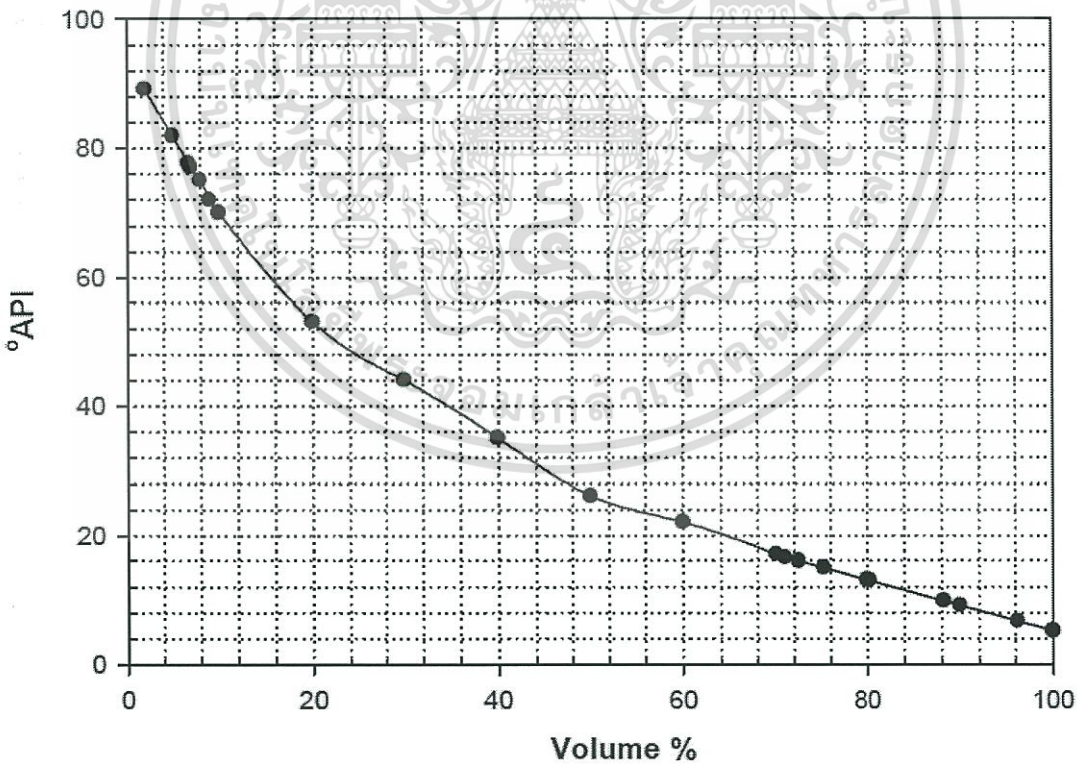
จากองค์ประกอบของน้ำมันดิบ สามารถคำนวณหาจุดเดือดเฉลี่ยโดยปริมาตรได้โดยใช้ข้อมูล จากรูปที่ 2.3 ได้ดังสมการ

$$VABP = \frac{T_0 + 4T_{50} + T_{100}}{6} \quad 2.5$$

และคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแต่ละองค์ประกอบได้โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 กราฟ TBP ของน้ำมันดิบจากประเทศซาอุดีอาระเบีย [7]



รูปที่ 2.4 กราฟ API ของน้ำมันดิบจากประเทศซาอุดีอาระเบีย [7]

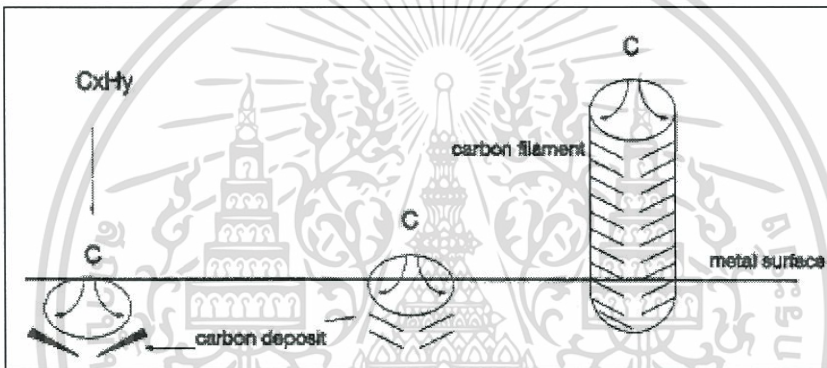
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 กลไกการเกิดโค้ก

จากงานวิจัยของ J. Towfighi และคณะ [1] กล่าวว่าปฏิกิริยาที่นำไปสู่การเกิดโค้กในท่อของเตาเผาน้ำมันดิบ มีด้วยกัน 3 ปฏิกิริยา ดังนี้

### 2.5.1 กลไกการเกิดโค้กจากตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic coking mechanism)

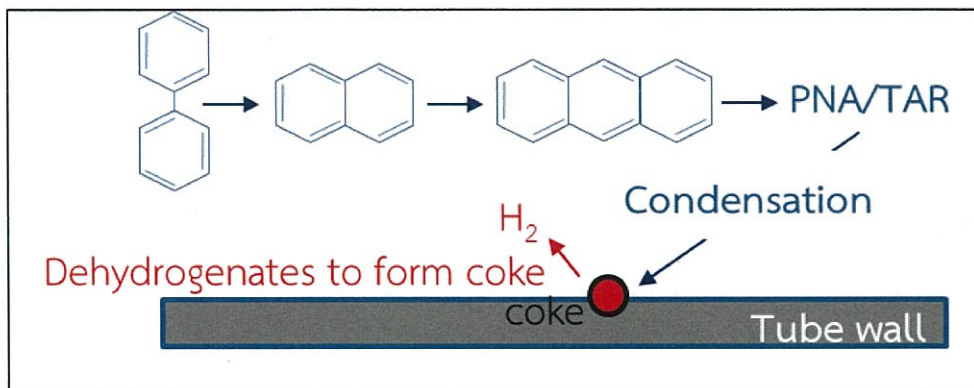
ท่อของเตาเผาในอุตสาหกรรมต่างๆมักจะประกอบไปด้วยโครเมียม นิกเกิล และ เหล็ก ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 2.5 ระหว่างการเริ่มเดินเครื่องเตาเผา สารไฮโดรคาร์บอนจะสัมผัสกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์โดยตรง ในช่วงแรกโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนจะถูกดูดซับด้วยกระบวนการทางเคมีบนพื้นผิวของผลึกโลหะ และเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้ผลิตภัณฑ์เป็นโค้ก ด้วยเหตุนี้อะตอมของคาร์บอนจะละลายและแพร่ผ่านอนุภาคของโลหะ ทำให้มีการสะสมของคาร์บอนในโลหะ และเกิดความเค้นในอนุภาคโลหะ อนุภาคของโลหะจึงยกตัวขึ้นจากพื้นผิวและผลึกคาร์บอน เกิดเป็นก้อนของคาร์บอนที่มีผลึกโลหะอยู่ที่ด้านบนสุด



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดเส้นใยโค้กจากตัวเร่งปฏิกิริยา [8]

### 2.5.2 การควบแน่นของโพลีอะโรมาติก (Polyaromatic condensation)

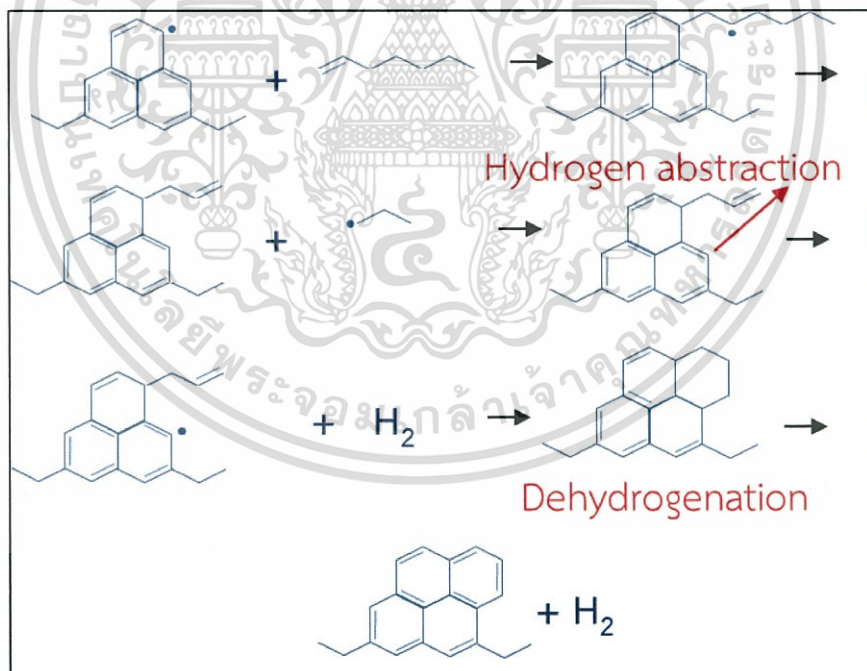
ปฏิกิริยาที่นี้แสดงถึงการเกิดโพลีนิวเคลียร์อะโรมาติก (Polynuclear aromatic) จากปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ (Radical reaction) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อะโรมาติกเป็นตัวกลางที่สำคัญ โดยอะโรมาติกบางชนิดจะเกิดจากปฏิกิริยาไตรเมอร์ไรเซชัน (Trimerization) และปฏิกิริยาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับอะเซทิลีน ปฏิกิริยานี้เริ่มต้นจากอะโรมาติกที่เกิดการควบแน่นและเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) ทำให้เกิดเป็นละอองของทาร์หรือเขม่าสีดำซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งของเหลวและของแข็งภายใต้สภาวะภายในเตาเผา น้ำมันดิบ ละอองบางส่วนจะกระทบกับผนังท่อ บางส่วนจะเข้าไปอยู่ในวัฏภาคไอ แต่จะโอกาสสูงมากที่จะเกาะติดบนพื้นผิวและถูกรวมไปในชั้นโค้ก เมื่อพื้นผิวด้านนอกของละอองเหล่านั้นไม่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันอย่างสมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันด้วยอนุมูลอิสระในวัฏภาคไอมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดชั้นโค้กและเกิดการสะสมต่อไป



รูปที่ 2.6 การเพิ่มขึ้นของโค้กจากการควบแน่น

### 2.5.3 กลไกการเกิดโค้กจากอนุมูลอิสระ (Radical coking mechanism)

โมเลกุลของสารไม่อิ่มตัวทั้งหมดสามารถเป็นตัวกำเนิดโค้กได้ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับตำแหน่งที่เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ของโค้กที่มีอยู่เดิม จากรูปที่ 2.7 จะแสดงลำดับการเกิดปฏิกิริยานี้ ในด้านโซ่อะลิฟาติก (Aliphatic) ของโมเลกุลอาจเกิดการสลายตัว ส่วนที่เหลืออยู่ของโมเลกุลจะทำปฏิกิริยาต่อจนกลายเป็นโครงสร้างวงแหวน และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อไปอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นวงอะโรมาติกต่อกันไปเรื่อยๆ และ ตำแหน่งที่เป็นอนุมูลอิสระของโค้กก็จะเกิดขึ้นมาใหม่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเกิดโค้กจากอนุมูลอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 วิธีกำจัดโค้ก

จากบทความของ R.Sahu และ คณะ [9] วิธีกำจัดโค้กที่ได้รับการยอมรับในอุตสาหกรรม จะประกอบไปด้วย 3 วิธีดังนี้

### 2.6.1 วิธีกำจัดโค้กโดยใช้ไอน้ำและอากาศ (Steam-air decoking)

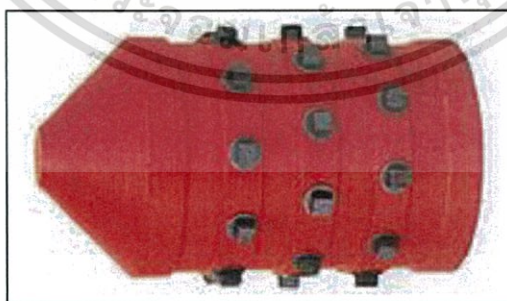
วิธีนี้ไอน้ำที่ผสมอยู่กับอากาศจะถูกป้อนให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อที่มีโค้กเกาะอยู่ และในขณะเดียวกันจะมีการให้ความร้อนกับท่อ จากนั้นโค้กจะเกิดการหดตัวและหลุดออกจากผนังท่อ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของโค้กที่อุณหภูมิสูง ไอน้ำ และอากาศ ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ วิธีนี้ถือเป็นวิธีที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้วิธีนี้ยังเสี่ยงต่อการแตกหักของท่ออีกด้วย

### 2.6.2 วิธีกำจัดโค้กแบบ On-line spalling

วิธีนี้เป็นการกำจัดโค้กโดยการทำให้อุณหภูมิภายในท่อเปลี่ยนแปลงอย่างเฉียบพลัน (Thermal shock) ในขณะที่เตาเผาน้ำมันดิบกำลังทำงานอยู่ โดยการปรับอัตราการไหลของไอน้ำและน้ำป้อนหม้อต้มที่ไหลผ่านท่อ ซึ่งจะทำให้โค้กที่เคลือบที่ผนังท่อหลุดออก วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถกำจัดโค้กได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเตาเผา น้ำมันดิบและส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าวิธีกำจัดโค้กโดยใช้ไอน้ำและอากาศ อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจจะไม่สามารถกำจัดโค้กออกจากท่อได้หมด จึงยังคงต้องกำจัดด้วยวิธีอื่นๆร่วมด้วย นอกจากนี้วิธีนี้ยังส่งผลกระทบต่อท่อ เนื่องจากอาจเกิดจากการหดตัวและขยายต่อระหว่างการจัดโค้ก

### 2.6.3 วิธีกำจัดโค้กเชิงกลแบบ Pigging (Mechanical pigging)

ปัญหาทั้งหมดที่เกิดจากการกำจัดโค้กด้วยสองวิธีก่อนหน้านี้จะไม่เกิดขึ้นกับวิธีนี้ การกำจัดโค้กเชิงกลแบบ Pigging นี้เป็นกระบวนการขับเคลื่อน Pig ผ่านเข้าไปในท่อโดยใช้ Pig launcher มีจุดประสงค์เพื่อทำความสะอาดและตรวจสอบท่อ โดย pig เป็นอุปกรณ์ที่ถูกใส่เข้าไปในท่อ สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยใช้ของไหลเป็นตัวขับเคลื่อน การกำจัดโค้กด้วยวิธีนี้สามารถกำจัดโค้กได้เกือบทั้งหมด และ ใช้เวลาน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ Pig [Nisshin-Polypig,Co.Ltd]

## บทที่ 3

# ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

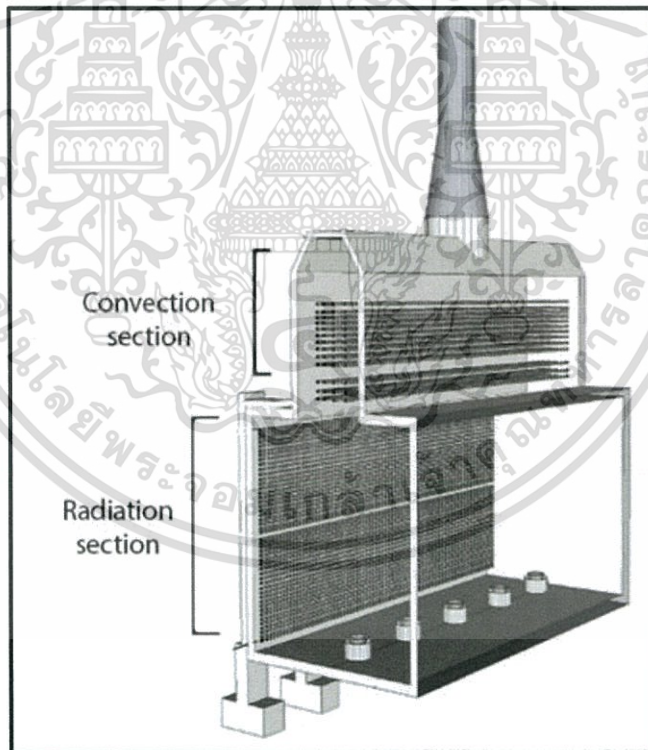
จากระเบียบวิธีการสร้างแบบจำลองของ I. Cameron และ คณะ [2] ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จึงได้นำมาใช้เป็นขั้นตอนในการดำเนินงานสร้างแบบจำลองการเกิดโค้กในเตาเผาบน้ำมันดิบ ดังนี้

#### 3.1.1 การกำหนดปัญหาและแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณหาปริมาณโค้กที่เคลือบผนังท่อ ณ เวลาใดๆ และคำนวณหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหยุดการทำงานของเตาเผาบน้ำมันดิบ เพื่อกำจัดโค้กที่สะสม โดยคำนึงให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

#### 3.1.2 สร้างแนวคิดของแบบจำลอง

ขอบเขตการคำนวณแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนการพาความร้อน และส่วนการแผ่รังสีความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เตาเผาบน้ำมันดิบ

โดยมีสมมุติฐานในการคำนวณ ดังนี้

- องค์ประกอบของน้ำมันดิบในท่อเหมือนกันทุกจุด
- โค้กที่เกิดขึ้นถือเป็นตะกรันทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเตาเผาบน้ำมันดิบ
- เปลวไฟมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม มีความสูงและอุณหภูมิคงที่
- อุณหภูมิของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เท่ากับอุณหภูมิของเปลวไฟในส่วนการแผ่รังสี

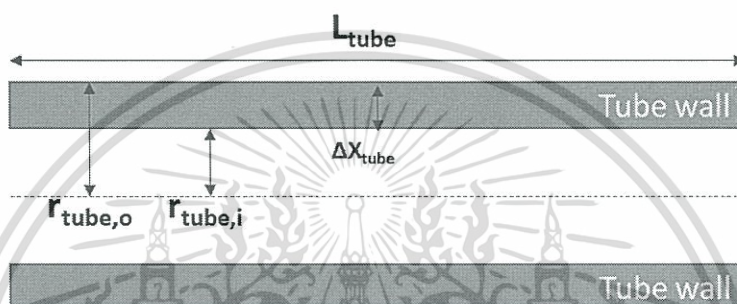
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นจำเป็นต้องใช้เอกสารนี้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการเกิดโค้กเท่ากับอัตราการเคลือบของโค้กที่ผนังท่อ
- โค้กที่เกิดขึ้นเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลวเท่านั้น
- โค้กเกิดขึ้นที่ปริมาณเท่ากันในทุกตำแหน่งของท่อ
- โค้กที่เกิดขึ้นมีความหนืดมาก ถือว่าไม่มีการไหลและไม่เกิดการพาความร้อนจากโค้ก

รวมทั้งรวบรวมสมการที่ใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อน สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

### 3.1.3 รวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการสร้างแบบจำลอง

รวบรวมพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ เช่น ลักษณะทางกายภาพของท่อในเตาเผา น้ำมันดิบ สมบัติของน้ำมันดิบ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 3.2 ลักษณะของท่อในเตาเผาน้ำมันดิบ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของเตาเผาน้ำมันดิบ

ข้อมูล		หน่วย
รัศมีท่อด้านใน ( $r_{\text{tube},i}$ )	0.048	เมตร
รัศมีท่อด้านนอก ( $r_{\text{tube},o}$ )	0.06	เมตร
ความยาวท่อ ( $L_{\text{tube}}$ )	3.4	เมตร
ความหนาท่อ ( $\Delta X_{\text{tube}}$ )	0.012	เมตร
จำนวนท่อ ( $n$ )	148	ท่อ
ความสูงเตาเผา	12.5	เมตร
ความกว้างเตาเผา	5.5	เมตร
ความยาวเตาเผา	5.2	เมตร

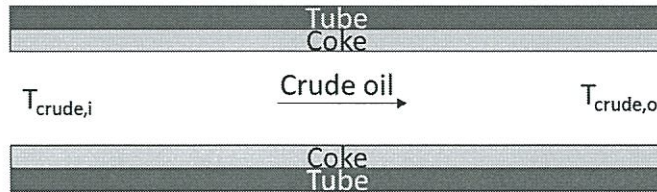
ตารางที่ 3.2 สภาวะดำเนินงาน

ข้อมูล		หน่วย
อัตราการไหล	45	กิโลกรัม/วินาที
อุณหภูมิที่เข้าเตาเผา	504.15	เคลวิน
อุณหภูมิหลังออกจากระบบการพาความร้อน	561.65	เคลวิน
อุณหภูมิที่ออกจากระบบแผ่รังสีความร้อน	635.00	เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 การสร้างแบบจำลอง

นำสมการและพารามิเตอร์ที่รวบรวมไว้ก่อนหน้านี้ มาสร้างเป็นแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังนี้



รูปที่ 3.3 ลักษณะของท่อและทิศทางการไหลของน้ำมันดิบภายในเตาเผา

#### 3.1.4.1 ส่วนการแผ่รังสีความร้อน ประกอบด้วยสมการ ดังนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันดิบในส่วนการแผ่รังสีความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$Q_{crude\ oil,r} = m_{crude\ oil} c_p (T_{crude\ oil,o,r} - T_{crude\ oil,i,r}) \quad 3.1$$

พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2

$$A_{tube,i} = 2\pi r_{tube,i} L_{tube} \quad 3.2$$

จากสมการการพาความร้อน  $Q_{crude\ oil,r} = h_{crude\ oil,r} A_{tube,i} (T_{coke,i} - T_{crude\ oil,o,r})$  สามารถจัดรูปเพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของโค้กที่สัมผัสกับน้ำมันดิบได้ ดังสมการที่ 3.3

$$T_{coke,i} = \frac{Q_{crude\ oil,r}}{h_{crude\ oil,r} A_{tube,i}} + T_{crude\ oil,o,r} \quad 3.3$$

ความหนาของโค้กเมื่อเกิดโค้กเคลือบทั่วทุกตำแหน่งของผนังท่อในเตาเผา น้ำมันดิบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

$$x_c = \frac{-2r_{tube,i} + \sqrt{(2r_{tube,i})^2 - (4 \times 0.01 \times r_{tube,i}^2)}}{-2} \quad 3.4$$

ปริมาตรของโค้กเมื่อเกิดโค้กเคลือบทั่วทุกตำแหน่งของผนังท่อในเตาเผา น้ำมันดิบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$V_c = \pi L_{tube} [r_{tube,i}^2 - (r_{tube,i} - x_c)^2] \quad 3.5$$

ปริมาตรของท่อจะลดลงเมื่อโค้กมีความหนามากขึ้น ซึ่งปริมาตรของท่อที่เปลี่ยนไปนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$V_{cd} = \pi L_{tube} [r_{tube,i}^2 - (r_{tube,i} - x_{coke})^2] \quad 3.6$$

ระยะของโค้กที่เคลือบผนังท่อสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.7

$$L_d = \frac{V_{cd}}{\pi r_{tube,i}^2 - (r_{tube,i} - x_c)^2} \quad 3.7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ของโค้กที่สัมผัสกับน้ำมันดิบเมื่อโค้กยังเคลือบไม่ทั่วทุกตำแหน่งของผนังท่อ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.8

$$C_{a1} = 2\pi r_{tube,i} L_d \quad 3.8$$

พื้นที่ของโค้กที่สัมผัสกับน้ำมันดิบเมื่อโค้กเคลือบทั่วทุกตำแหน่งของผนังท่อ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.9

$$C_{a2} = 2\pi(r_{tube,i} - x_{coke})L_{tube} \quad 3.9$$

พื้นที่ของผนังท่อที่ไม่มีโค้กเคลือบสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.10

$$C_{at} = (2\pi r_{tube,i} L_{tube}) - C_{a1} \quad 3.10$$

อัตราการเกิดโค้กขององค์ประกอบ  $m$  สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.11

$$r_m = (C_m \times cat \times k_r) + (C_m \times C_a \times k_1) \quad 3.11$$

ความหนาของโค้กที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.12

$$x_{coke} = \frac{r_{m,n} \times MW_m \times t \times V_{furnace,r}}{\rho_{coke} A_{tube,i}} \quad 3.12$$

เมื่อนำสมการการนำความร้อน  $Q_{crudeoil,r} = \frac{k_{coke} A_{tube,i} (T_{tube,i,r} - T_{coke,i})}{x_{coke}}$  มาจัดรูป จะ

สามารถคำนวณอุณหภูมิของผนังท่อด้านใน ได้ดังสมการที่ 3.13

$$T_{tube,i,r} = T_{coke,o,r} = \frac{Q_{crudeoil,r} \times x_{coke}}{k_{coke} A_{tube,i}} + T_{coke,i} \quad 3.13$$

พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของท่อด้านนอกสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.14

$$A_{tube,o} = 2\pi r_{tube,o} L_{tube} \quad 3.14$$

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.15

$$k_{tube,r} = -1.257 + \frac{0.04327(T_{tube,i} + T_{tube,o})}{2} \quad 3.15$$

เมื่อนำสมการการนำความร้อน  $Q_{crudeoil,r} = \frac{k_{tube,r} A_{tube,o} (T_{tube,o,t} - T_{tube,i})}{x_{tube}}$  มาจัดรูป จะ

สามารถคำนวณอุณหภูมิของผนังท่อด้านนอก ได้ดังสมการที่ 3.16

$$T_{tube,o,t} = \frac{Q_{crudeoil,r} \times \Delta x_{tube}}{k_{tube,r} A_{tube,o}} + T_{tube,i} \quad 3.16$$

อัตราการนำความร้อนในผนังท่อจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของ

เปลวไฟและแก๊สรวมกับอัตราการพาความร้อนจากแก๊ส สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.17  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= 2\pi L_{tube} k_{tube,r} \frac{T_{tube,o,t} - T_{tube,i}}{\ln\left(\frac{r_{tube,o}}{r_{tube,i}}\right)} \\ &= \frac{\sigma(T_{flame}^4 - T_{tube,o,t}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{tube}}{\varepsilon_{tube} A_{tube,o}} + \frac{1}{A_{flame} F_{ij}}} + h_{gas} A_{tube,o} (T_{gas} - T_{tube,o,t}) + \frac{\sigma(T_{gas}^4 - T_{tube,o,t}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{tube}}{\varepsilon_{tube} A_{tube,o}} + \frac{1}{A_{gas} F_{ij}}} \end{aligned} \quad 3.17$$

### 3.1.4.2 ส่วนการพาความร้อน ประกอบด้วยสมการ ดังนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันดิบในส่วนการพาความร้อนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.18

$$Q_{crude\ oil,conv} = m_{crude\ oil} c_p (T_{crude\ oil,o,conv} - T_{crude\ oil,i,conv}) \quad 3.18$$

จากสมการการพาความร้อน  $Q_{crude\ oil,conv} = h_{crude\ oil,conv} A_{tube,i} (T_{coke,i,conv} - T_{crude\ oil,o,conv})$  สามารถจัดรูปเพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของโค้กที่สัมผัสกับน้ำมันดิบได้ ดังสมการที่ 3.19

$$T_{coke,i,conv} = \frac{Q_{crude\ oil,conv}}{h_{crude\ oil,conv} A_{tube,i}} + T_{crude\ oil,o,conv} \quad 3.19$$

อัตราการเกิดโค้กขององค์ประกอบ  $m$  สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.20

$$r_m = (C_m \times cat \times k_r) + (C_m \times C_a \times k_1) \quad 3.20$$

ความหนาของโค้กที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.21

$$x_{coke} = \frac{r_m \times MW_m \times t \times V_{furnace,conv}}{\rho_{coke} A_{tube,i}} \quad 3.21$$

เมื่อนำสมการการนำความร้อน  $Q_{crude\ oil,conv} = \frac{k_{coke} A_{tube,i} (T_{tube,i,conv} - T_{coke,i,conv})}{x_{coke}}$  มาจัด

รูป จะสามารถคำนวณอุณหภูมิของผนังท่อด้านใน ได้ดังสมการที่ 3.22

$$T_{tube,i,conv} = T_{coke,o,conv} = \frac{Q_{crude\ oil,conv} \times x_{coke}}{k_{coke} A_{tube,i}} + T_{coke,i,conv} \quad 3.22$$

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.23

$$k_{tube,conv} = -1.257 + \frac{0.04327(T_{tube,i,conv} + T_{tube,o,conv})}{2} \quad 3.23$$

เมื่อนำสมการการนำความร้อน  $Q_{crude\ oil,conv} = \frac{k_{tube,conv} A_{tube,o} (T_{tube,o,conv} - T_{tube,i,conv})}{x_{tube}}$  มา

จัดรูป จะสามารถคำนวณอุณหภูมิของผนังท่อด้านนอก ได้ดังสมการที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{tube,o,conv} = \frac{Q_{crude\ oil,conv} \times \Delta x_{tube}}{k_{tube,conv} A_{tube,o}} + T_{tube,i,conv} \quad 3.24$$

อัตราการนำความร้อนในผนังท่อจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊ส รวมกับอัตราการพาความร้อนจากแก๊ส สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.25

$$\begin{aligned} \dot{Q}_2 &= 2\pi L_{tube} k_{tube,conv} \left( \frac{T_{tube,o,conv} - T_{tube,i,conv}}{\ln\left(\frac{r_{tube,o}}{r_{tube,i}}\right)} \right) \quad 3.25 \\ &= h_{gas} A_{tube,o} (T_{gas} - T_{tube,o,t}) + \frac{\sigma(T_{gas}^4 - T_{tube,o,t}^4)}{\frac{1 - \epsilon_{tube}}{\epsilon_{tube} A_{tube,o}} + \frac{1}{A_{gas} F_{ij}}} \end{aligned}$$

เมื่อนำความร้อนที่ใช้ในแต่ละส่วนมารวมกัน จะได้ปริมาณความร้อนที่ต้องการจากเชื้อเพลิงทั้งหมดดังสมการ

$$Q_{total} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad 3.22$$

จากสมการข้างต้นสามารถสร้างเป็นเมทริกซ์ 3 แนวเฉียงได้ตารางที่ 3.1 และ 3.2

### 3.1.5 วิธีการแก้ปัญหาของแบบจำลอง

ในการเขียนแบบจำลองนี้จะใช้ฟังก์ชัน ode15s ของโปรแกรม MATLAB ในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equations : ODEs) โดยฟังก์ชันนี้จะใช้การหาอนุพันธ์เชิงตัวเลข (Numerical differentiation) ด้วยวิธีเชิงปริยาย (Implicit method) ในการแก้ปัญหา เพื่อคำนวณหาอัตราการเกิดโค้กภายในเตาเผาน้ำมันดิบ ดังแสดงใน ภาคผนวก ข ฟังก์ชัน xcoke

### 3.1.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำเพื่อตรวจสอบผลการคำนวณว่าเป็นไปตามแนวคิดที่วางไว้หรือไม่ เช่น เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณโค้กจะต้องเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณโค้กเพิ่มขึ้นจะต้องใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้มากขึ้น ตัวแปรบางค่าจะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ตัวแปรบางค่าจะต้องมีค่าเปลี่ยนไปตามเวลา เมื่อความมอดค์ประกอบของน้ำมันดิบเปลี่ยนไปอัตราการเกิดโค้กจะเปลี่ยนไป เป็นต้น

### 3.1.7 การตรวจสอบการนำไปใช้ของแบบจำลอง

การตรวจสอบการนำไปใช้ของแบบจำลอง สามารถตรวจสอบได้โดยการเปรียบเทียบอัตราการเกิดโค้กที่ได้จากแบบจำลอง กับอัตราการเกิดโค้กที่เกิดขึ้นจริง โดยอัตราการเกิดโค้กที่เกิดขึ้นจะต้องมีลักษณะเป็น S-curve และ ต้องสัมพันธ์กับปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น

### 3.1.8 การจัดการและซ่อมบำรุงแบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้ทำได้โดยการจัดเรียงข้อมูลในแบบจำลองให้เป็นสัดส่วน มีการเขียนคำอธิบายของแต่ละขั้นตอนเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจหรือแก้ไขในอนาคต

### 3.1.9 การคำนวณเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโค๊ก (Optimization)

ในขั้นตอนนี้จะนำอัตราการใช้เชื้อเพลิงในแต่ละเดือนที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง มาคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวกเตาเผาและค่าการสูญเสียรายได้ต่อปี เมื่อมีการหยุดการดำเนินงานเตาเผาในเวลาที่แตกต่างกัน และนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดและระยะเวลาในการดำเนินงานเตาเผา เพื่อหาจุดที่มีค่าใช้จ่ายต่ปีต่ำที่สุด



ตารางที่ 3.3 เมทริกซ์สามแนวเฉียงสำหรับการคำนวณในส่วนการแผ่รังสีความร้อน

สมการที่	พารามิเตอร์ (parameter)																	
3.1	$m_{\text{crude oil}}, c_p, T_{\text{crude,o,r}}, T_{\text{crude,i,r}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$																
3.2	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$															
3.3	$h_{\text{crude oil,r}}, T_{\text{crude oil,o,r}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$														
3.4	$r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$													
3.5	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$												
3.6	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$								$x_{\text{coke,r}}$			
3.7	$r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$										
3.8	$r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$									
3.9	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$					$x_{\text{coke,r}}$			
3.10	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat							
3.11	$C_m, k_r, k_l$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	$r_m$						
3.12	$t, MW, V_{\text{furnace,r}}, \rho_{\text{coke}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	$r_m$	$x_{\text{coke,r}}$					
3.13	$k_{\text{coke}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	$r_m$	$x_{\text{coke,r}}$	$T_{\text{tube,i,r}}$				
3.14	$r_{\text{tube,o}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	$r_m$	$x_{\text{coke,r}}$	$T_{\text{tube,i,r}}$	$A_{\text{tube,o}}$			
3.16	$\Delta x_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	$r_m$	$x_{\text{coke,r}}$	$T_{\text{tube,i,r}}$	$A_{\text{tube,o}}$	$T_{\text{tube,o,r}}$	$k_{\text{tube,r}}$	
3.15	-	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	$r_m$	$x_{\text{coke,r}}$	$T_{\text{tube,i,r}}$	$A_{\text{tube,o}}$	$T_{\text{tube,o,r}}$	$k_{\text{tube,r}}$	
3.17	$L_{\text{tube}}, r_{\text{tube,o}}, r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,r}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	$r_m$	$x_{\text{coke,r}}$	$T_{\text{tube,i,r}}$	$A_{\text{tube,o}}$	$T_{\text{tube,o,r}}$	$k_{\text{tube,r}}$	$Q_l$

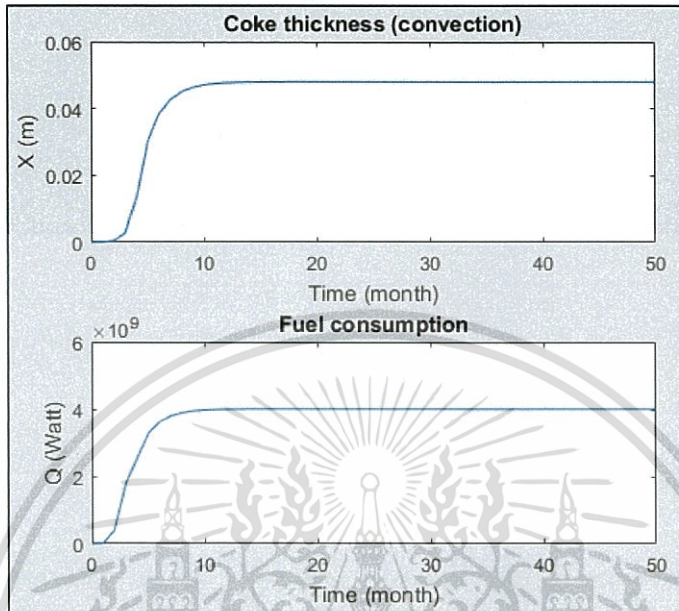
ตารางที่ 3.4 เมทริกซ์สามแนวเฉียงสำหรับการคำนวณในส่วนการพาความร้อน

สมการที่	พารามิเตอร์ (parameter)																	
3.18	$m_{\text{crude oil}}, c_p, T_{\text{crude,o,conv}}, T_{\text{crude,i,conv}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$																
3.2	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$															
3.19	$h_{\text{crude oil,conv}}, T_{\text{crude oil,o,conv}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$														
3.4	$r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$													
3.5	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$												
3.6	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$							$x_{\text{coke,conv}}$				
3.7	$r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$										
3.8	$r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$									
3.9	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$				$x_{\text{coke,conv}}$				
3.10	$r_{\text{tube,i}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat							
3.20	$C_m, k_r, k_l$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	r						
3.21	$t, MW, V_{\text{furnace,conv}}, \rho_{\text{coke}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	r	$x_{\text{coke,conv}}$					
3.22	$k_{\text{coke}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	r	$x_{\text{coke,conv}}$	$T_{\text{tube,i,conv}}$				
3.14	$r_{\text{tube,o}}, L_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	r	$x_{\text{coke,conv}}$	$T_{\text{tube,i,conv}}$	$A_{\text{tube,o}}$			
3.24	$\Delta x_{\text{tube}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	r	$x_{\text{coke,conv}}$	$T_{\text{tube,i,conv}}$	$A_{\text{tube,o}}$	$T_{\text{tube,o,conv}}$	$k_{\text{tube,conv}}$	
3.23	-	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	r	$x_{\text{coke,conv}}$	$T_{\text{tube,i,conv}}$	$A_{\text{tube,o}}$	$T_{\text{tube,o,conv}}$	$k_{\text{tube,conv}}$	
3.25	$L_{\text{tube}}, r_{\text{tube,o}}, r_{\text{tube,i}}$	$Q_{\text{crude oil,conv}}$	$A_{\text{tube,i}}$	$T_{\text{coke,i,conv}}$	$x_c$	$V_c$	$V_{cd}$	$L_d$	$C_{a1}$	$C_{a2}$	cat	r	$x_{\text{coke,conv}}$	$T_{\text{tube,i,conv}}$	$A_{\text{tube,o}}$	$T_{\text{tube,o,conv}}$	$k_{\text{tube,conv}}$	$Q_2$

## บทที่ 4

# ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

### 4.1 ผลการสร้างแบบจำลอง (Modeling result)



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองอัตราการเพิ่มขึ้นของโค้กใน ส่วนการพาความร้อนและอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ในการสร้างแบบจำลองการเกิดโค้กภายในเตาเผา น้ำมันดิบ พบว่า อัตราการเกิดโค้กสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

#### ช่วงที่ 1 (เดือนที่ 0 – 3)

มีอัตราการเกิดโค้กต่ำ เนื่องจากโค้กที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันดิบและองค์ประกอบของท่อที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น นิกเกิล โครเมียม ซึ่งปฏิกิริยานี้มีค่าคงที่อัตราที่ต่ำ ทำให้ในจะเกิดโค้กเคลือบที่ผิวท่ออย่างช้าๆ

#### ช่วงที่ 2 (เดือนที่ 3 – 7)

เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณโค้กจะเพิ่มมากขึ้น โดยโค้กที่เกิดขึ้นนี้จะเคลือบอยู่ที่ผิวท่อ ทำให้พื้นที่ของท่อที่สัมผัสกับน้ำมันดิบลดลง ปฏิกิริยาที่เกิดจากน้ำมันดิบกับองค์ประกอบของท่อจึงลดลง แต่เกิดปฏิกิริยาส่วนมากที่เกิดขึ้นจะเป็นระหว่างน้ำมันดิบและโค้กที่เคลือบอยู่ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีค่าคงที่อัตราสูง จึงทำให้ในช่วงนี้มีอัตราการเกิดโค้กที่รวดเร็ว

#### ช่วงที่ 3 (เดือนที่ 7 เป็นต้นไป)

ในช่วงนี้จะพบว่าอัตราการเกิดโค้กจะลดลงจนคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณโค้กที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดลดลง พื้นที่ที่โค้กสัมผัสกับน้ำมันดิบในท่อเพื่อทำปฏิกิริยาจะลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเรื่อยๆจนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

เมื่อภายในท่อมีปริมาณโค้กเพิ่มมากขึ้น เชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนจะต้องใช้มากขึ้น เพื่อให้ได้อุณหภูมิของน้ำมันดิบตามที่ต้องการ ซึ่งอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะสัมพันธ์กับอัตราการเกิดโค้กดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1

## 4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Verification result)

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสามารถทำได้โดยตรวจสอบ ดังนี้

### 4.2.1 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโค้กและเชื้อเพลิง

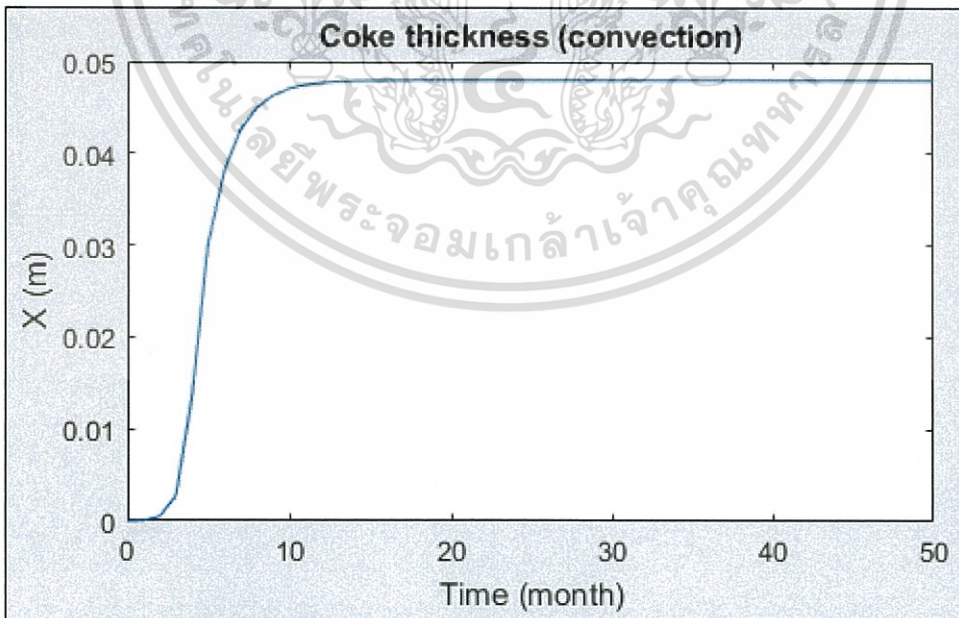
เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณโค้กจะเพิ่มขึ้นและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณโค้ก ดังแสดงในรูปที่ 4.1

### 4.2.2 ตัวแปรบางค่าจะมีค่าเป็นบวกเสมอ และ บางตัวจะเปลี่ยนค่าไปตามเวลา

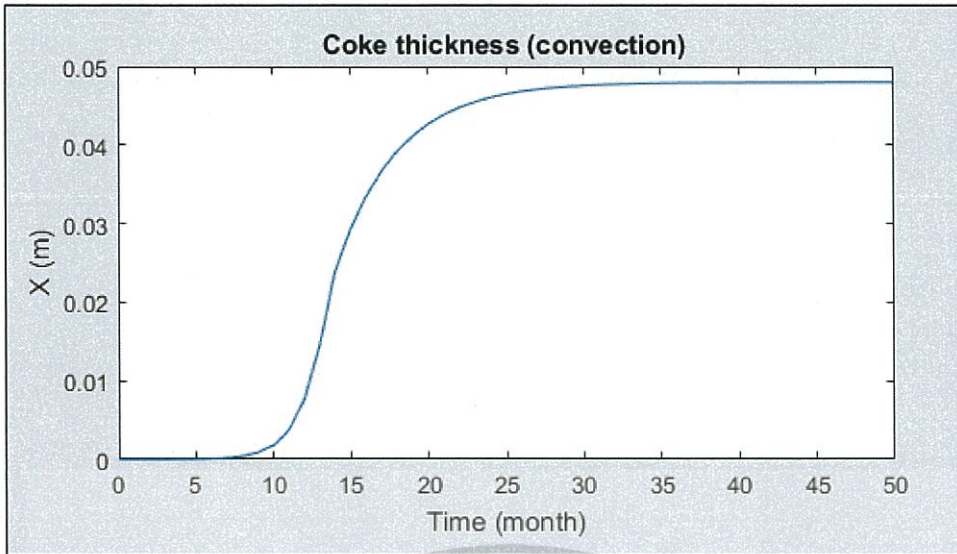
จากการตรวจสอบพบว่าตัวแปรที่จะต้องเป็นบวกเสมอ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณโค้ก พื้นที่ มีค่าเป็นบวก และตัวแปรที่ต้องเปลี่ยนไปตามเวลา เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ อุณหภูมิของผนังท่อด้านใน อุณหภูมิของผนังท่อด้านนอก ความหนาโค้ก มีค่าเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งถูกต้องตามแนวคิดที่วางไว้

### 4.2.4 เมื่อองค์ประกอบของน้ำมันดิบเปลี่ยนไปอัตราการเกิดโค้กจะเปลี่ยนไป

เมื่อนำรูปที่ 4.2 ซึ่ง แสดงผลการสร้างแบบจำลองการเกิดโค้กในส่วนการพาความร้อนเมื่อน้ำมันดิบมีองค์ประกอบของเนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกากน้ำมัน มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3 ที่แสดงผลการสร้างแบบจำลองการเกิดโค้กเมื่อน้ำมันดิบที่เข้ามาไม่มีกากน้ำมันเป็นองค์ประกอบ (มีเพียง 4 องค์ประกอบ) จะเห็นได้ว่า เมื่อมีเพียง 4 องค์ประกอบ อัตราการเกิดโค้กจะแตกต่างจากน้ำมันดิบที่มีครบทุกองค์ประกอบ เนื่องจากกากน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่มีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง เมื่อไม่มีกากน้ำมันเป็นองค์ประกอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงช้าลง



รูปที่ 4.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของโค้กเมื่อน้ำมันดิบที่เข้ามามี 5 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของโค้กเมื่อน้ำมันดิบที่เข้ามาไม่มีกากน้ำมันเป็นองค์ประกอบ

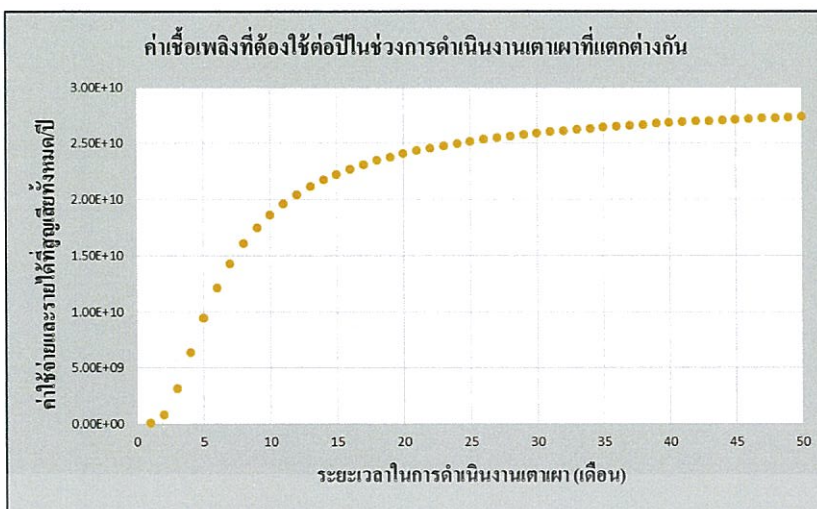
### 4.3 ผลการคำนวณเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโค้ก (Optimization)

จากที่กล่าวมาในบทก่อนหน้า เนื่องจากมีโค้กเคลือบที่ผิวด้านในท่อของเตาเผา น้ำมันดิบ ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง จึงต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ได้น้ำมันดิบที่อุณหภูมิที่ต้องการ ดังนั้น หากปล่อยให้ปริมาณโค้กมากขึ้น โดยไม่ทำการกำจัดออก จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิงมากขึ้น

รูปที่ 4.5 แสดงค่าเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ต่อปีในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาดำเนินงานเตาเผาสั้น (มีการหยุดการดำเนินงานเพื่อทำความสะอาดบ่อย) จะมีค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิงต่ำ แต่ถ้าหากให้ระยะเวลาดำเนินงานเตาเผามากขึ้น โดยปล่อยให้โค้กเคลือบที่ผนังท่อ ค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิงก็จะเพิ่มขึ้น

ในทางกลับกันในการหยุดการดำเนินงานของเตาเผาแต่ละครั้งจะมีค่าใช้จ่ายสำหรับการทำความสะอาดท่อ นอกจากนี้ยังสูญเสียรายได้จากการผลิตสินค้าอีกด้วย จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาดำเนินงานเตาเผาสั้น เพื่อให้มีการกำจัดโค้กบ่อย จะทำให้เสียค่าทำความสะอาดและสูญเสียรายได้มาก แต่ถ้าหากให้ระยะเวลาดำเนินงานเตาเผามากขึ้น โดยปล่อยให้โค้กเคลือบผนังท่อ ค่าใช้จ่ายในด้านนี้ก็จะต่ำ

เมื่อนำค่าใช้จ่ายทั้งด้านเชื้อเพลิง ค่าทำความสะอาด และการสูญเสียรายได้มาสร้างเป็นกราฟ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.7 และเมื่อขยายกราฟในช่วงเดือนที่ 4-10 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า การหยุดทำงานของเตาเผา น้ำมันดิบในเดือนที่ 7 มีความคุ้มค่าที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงที่เสียค่าใช้จ่ายต่อปีน้อยที่สุด คิดเป็นเงิน 2.75 หมื่นล้านบาทต่อปี



รูปที่ 4.4 ค่าเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ต่อปีในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่แตกต่างกัน

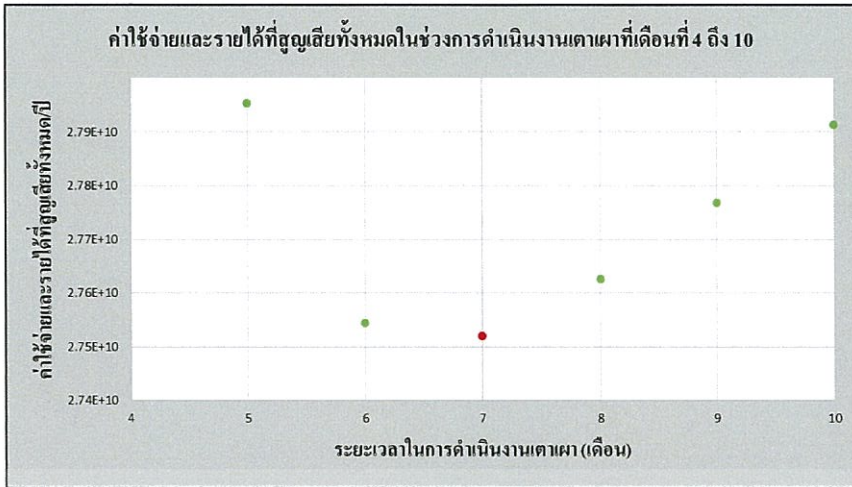


รูปที่ 4.5 ค่าทำความสะอาดและรายได้ที่สูญเสียต่อปีในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายและรายได้ที่สูญเสียทั้งหมดในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพขยายค่าใช้จ่ายและรายได้ที่สูญเสียทั้งหมดในช่วงการดำเนินงานเตาเผาที่เดือนที่ 4 -10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษากลไกการเกิดโค้กและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผา น้ำมันดิบ โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองสมการอนุพันธ์เชิงสามัญ (Ordinary differential equation : ODE) ผลของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณการเกิดโค้กและปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบ่งเป็น 3 ช่วง ซึ่งสามารถนำมาวาดกราฟที่มีลักษณะเป็น S-curve สอดคล้องกับการเกิดตะกรันภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อนำค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้แก่ ค่าเชื้อเพลิง ค่าทำความสะอาดเตาเผา และรายได้ที่สูญเสียระหว่างการหยุดดำเนินการเตาเผาน้ำมันดิบ มาสร้างกราฟเทียบกับเวลาในการกำจัดโค้ก จะสามารถทำนายเวลาที่คุ้มค่าที่สุดในการกำจัดโค้กได้ โดยพิจารณาจากเวลาที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด และพบว่าการกำจัดโค้กในเดือนที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด คิดเป็นเงิน 2.75 หมื่นล้านบาทต่อปี

ผลจากการสร้างแบบจำลองและการหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโค้กนี้จะเป็นประโยชน์ต่อโรงกลั่นน้ำมัน เนื่องจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านการกำจัดโค้กให้ต่ำสุดได้ แต่ในการนำแบบจำลองนี้ไปใช้ ผู้ใช้จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้ตรงตามคุณลักษณะที่นำไปใช้ เช่น โครงสร้างของเตาเผา องค์ประกอบของน้ำมันดิบ เป็นต้น

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างแบบจำลองการเกิดโค้กในเตาเผาควรปรับปรุงการตั้งสมมติฐานในการคำนวณ โดยควรพิจารณาให้องค์ประกอบของน้ำมันดิบเปลี่ยนไปเมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้น และโค้กที่เกิดขึ้นแต่ละตำแหน่งของท่อจะมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำมันดิบ และในส่วนของเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve fitting) เพื่อหาค่าคงที่อัตราในการสร้างแบบจำลองนี้ ค่าที่ได้เป็นการค่าคงที่อัตรารวมของปฏิกิริยารวม ทำให้ผลของความเข้มข้นของแต่ละองค์ประกอบของน้ำมันดิบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นเพียงการประเมินคร่าวๆเท่านั้น หากต้องการให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น ควรหาข้อมูลอัตราการเกิดโค้กที่เกิดจากแต่ละองค์ประกอบและจากแต่ละปฏิกิริยาย่อยมาใช้ในการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Towfighi, M. Sadrameli, and A. Niaei, "Coke formation mechanisms and coke inhibiting methods in pyrolysis furnaces," *J. Chem. Eng. Japan*, vol. 35, no. 10, pp. 923–937, 2002.
- [2] I. Cameron and R. Gani, *Product and Process Modelling A Case Study Approach*, First edit. Oxford: Elsevier B.V., 2011.
- [3] A. Chaibakhsh, N. Ensansifat, A. Jamali, R. Kouhikamali, and H. Najafi, "Crude oil direct fired furnace model," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 83, pp. 57–70, May 2015.
- [4] B. Aronia, "FURNACE (ENGINEERING DESIGN GUIDELINE)," p. 23, 2013.
- [5] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer*, Fifth Edit. New York: McGraw-Hill education, 2015.
- [6] Thai Customs Department, "Statistic data of December 2016 - by country," 2016. [Online]. Available: [http://www.customs.go.th/statistic\\_report.php?tab=by\\_country](http://www.customs.go.th/statistic_report.php?tab=by_country).
- [7] R. Uppaluri, "Refinery Process Design," *Indian Inst. Technol. Guwahati*, no. March, 2010.
- [8] G. C. Reyniers, G. F. Froment, F. D. Kopinke, and G. Zimmermann, "Coke Formation in the Thermal Cracking of Hydrocarbons. 4. Modeling of Coke Formation in Naphtha Cracking," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 2584–2590, 1994.
- [9] R. Sahu, S. K. Choudhary, U. Yadav, and M. K. E. Prasad, "A novel approach to cleaning furnace coils," *Pet. Technol. Q.*, vol. 18, no. 3, pp. 1–8, 2013.

# ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองส่วนการแผ่รังสีความร้อน

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
$m_{\text{crude oil}}$	45	kg/s
$C_p$	3.35	kJ/kg·K
$T_{\text{crude,o,r}}$	635	K
$T_{\text{crude,i,r}}$	561.65	K
$r_{\text{tube,i}}$	0.048	m
$L_{\text{tube}}$	3.4	m
$h_{\text{crude oil,r}}$	3,737	W/m <sup>2</sup> ·K
$C_{\text{naphtha}}$	17315.92	mol/lit
$C_{\text{kerosene}}$	11798.58	mol/lit
$C_{\text{LGO}}$	20144.93	mol/lit
$C_{\text{HGO}}$	14019.78	mol/lit
$C_{\text{residue}}$	295895.16	mol/lit
$V_{\text{furnace,r}}$	2.3626	m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{coke}}$	900	kg/ m <sup>3</sup>
$MW_{\text{naphtha}}$	106.428	mol/g
$MW_{\text{kerosene}}$	169.481	mol/g
$MW_{\text{LGO}}$	228.121	mol/g
$MW_{\text{HGO}}$	278.165	mol/g
$MW_{\text{residue}}$	594.377	mol/g
$k_{\text{coke}}$	6.46	W/m·K
$r_{\text{tube,o}}$	0.06	m
$\Delta x_{\text{tube}}$	0.012	m
$h_{\text{gas}}$	277	W/m <sup>2</sup> ·K

ตารางที่ ก.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองส่วนการพาความร้อน

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
$T_{\text{crude,o,conv}}$	561.65	K
$T_{\text{crude,i,conv}}$	504.15	K
$h_{\text{crude oil,conv}}$	4,871	W/m <sup>2</sup> ·K
$h_{\text{gas,conv}}$	238.5	W/m <sup>2</sup> ·K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการOptimization

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ความยาวท่อ	503.2	m
ค่า pigging	695.07	Baht/m
เวลาในการ pigging	22	hr.
ราคาน้ำมัน	846.3	Baht/barrel
ราคามีเทน	250	Baht/mmBTU



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การเขียน Code ในโปรแกรม MATLAB

#### Script

```
clc
```

```
clear
```

```
%% m = component --> naphtha kerosene LGO HGO residue
```

```
%% t = time
```

```
%% s = section --> convection radiation
```

```
% r = radiation and conv = convection
```

```
%% parameter radiation section
```

```
m_crudeoil = 45; %kg/s
c_p = 3.35; %kJ/kg K Cp crude oil
T_crudeo_r = 635; %K
T_crudei_r = 561.65; %K
r_tubei = 0.048; %m
L_tube = 3.4; %m
h_crudeoil_r = 3737; %W/m^2K
C = [4.307e-3 1.164e-3 1.097e-3 5.137e-4 2.374e-3] %mol/lit
V_furnace_r = (96)*pi*(r_tubei^2)*L_tube; %m^3 --> 96 = No. tube
density_coke = 900; %kg/m^3
time = [0:50]; %month
MW = [106.428 169.481 228.121 278.165 594.377]; %m component
k_coke = 6.46; % W/mK (coke thermal conductivity)
r_tubeo = 0.06; % m
deltaX_tube = 0.012; % m
```

```
% initial condition
```

```
x_coke0 = 0; % each component
```

```
%% calculation radiation section
```

```
Q_crudeoil_r = m_crudeoil*c_p*(T_crudeo_r - T_crudei_r);
```

```
A_tubei = 2*pi*(r_tubei)*L_tube;
```

```
T_cokei = (Q_crudeoil_r/(h_crudeoil_r*A_tubei)) + T_crudeo_r;
```

```
int_k1 = 8e-10*(60*60*24*30); %1/month
```

```
int_k_r = 1e-16*(60*60*24*30); % 1/month
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int=[int_k1 int_k_r]
est = fminsearch(@constant,int)
k1 = est(1)
k_r = est(2)

[t_x_coke_t_r] =
ode15s(@xcoke,time,x_coke0,[],MW,V_furnace_r,density_coke,A_tubei,C_r_tubei,L_tube
e,k1,k_r); %UNIT m    %total coke at time

T_tubei_r = (Q_crudeoil_r*x_coke_t_r/(k_coke*A_tubei))+T_cokei; % = T_cokeo

A_tubeo = 2*pi*r_tubeo*L_tube; %Const

%%%initial guess
int_T_tubeo_r = 1500; %guess
int_k_tube_r = 63.648; %guess
int_r = [int_T_tubeo_r , int_k_tube_r];

est = lsqnonlin(@cal_kT,int_r,[],[],T_tubei_r(1),A_tubeo,Q_crudeoil_r,deltaX_tube);
T_tubeo_r(1,1) = est(1);
k_tube_r(1,1) = est(2);

for i = 2:length(T_tubei_r)

    int_r = [T_tubeo_r(i-1) , k_tube_r(i-1)];
    est = lsqnonlin(@cal_kT,int_r,[],[],T_tubei_r(i),A_tubeo,Q_crudeoil_r,deltaX_tube);
    T_tubeo_r(i,1) = est(1);
    k_tube_r(i,1) = est(2);

end

for i = 1:length(T_tubeo_r)
Q_rad(i) = 2*pi*L_tube*k_tube_r(i)*((T_tubeo_r(i)-T_tubei_r(1))./(log(r_tubeo/r_tubei)))
%Watt/month
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

parameters convection section

```
T_crudeo_conv = 561.65 % = T_crude_i
T_crudei_conv = 504.15
h_crudeoil_conv = 4871 %w/m^2K
V_furnace_conv = (52)*pi*(r_tubei^2)*L_tube; %m^3 --> 52 = No. tube
h_gas_conv = 238.5 %w/m^2K
```

calculation convection section

```
Q_crudeoil_conv = m_crudeoil*c_p*(T_crudeo_conv-T_crudei_conv)
T_cokei_conv = (Q_crudeoil_conv/(h_crudeoil_conv*A_tubei))+T_crudeo_conv
```

```
[t x_coke_t_conv] =
```

```
ode15s(@xcoke,time,x_coke0,[],MW,V_furnace_conv,density_coke,A_tubei,C,r_tubei,L_tube,k1,k_r)
```

```
T_tubei_conv =
(Q_crudeoil_conv*x_coke_t_conv/(k_coke*A_tubei))+T_cokei_conv % = T_cokeo
```

initial guess

```
int_T_tubeo_conv = 1500 %guess
int_k_tube_conv = 63.648 %guess
int_conv = [int_T_tubeo_conv, int_k_tube_conv]
```

```
est =
```

```
lsqnonlin(@cal_kT,int_conv,[],[],T_tubei_conv(1),A_tubeo,Q_crudeoil_conv,deltaX_tube);
```

```
T_tubeo_conv(1,1) = est(1);
```

```
k_tube_conv(1,1) = est(2);
```

```
for i = 2:length(T_tubei_r)
```

```
int_conv = [T_tubeo_conv(i-1), k_tube_conv(i-1)];
```

```
est =
```

```
lsqnonlin(@cal_kT,int_conv,[],[],T_tubei_conv(i),A_tubeo,Q_crudeoil_conv,deltaX_tube);
```

```
T_tubeo_conv(i,1) = est(1);
```

```
k_tube_conv(i,1) = est(2);
```

```
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i = 1:length(T_tubeo_r)
Q_conv(i) = 2*pi*L_tube*k_tube_conv(i)*((T_tubeo_conv(i)-
T_tubei_conv(1))./(log(r_tubeo/r_tubei))) %Watt/month
end

```

```

Q_total = Q_rad+Q_conv
xQ_total = [time(1:end-1); time(1:end-1); time(2:end); time(2:end)];
yQ_total = [zeros(1,50); Q_total(1:end-1); Q_total(2:end); zeros(1,50)];
p = patch(xQ_total,yQ_total,'b','LineWidth',1.5);
cdistance = cumtrapz(Q_total);
Q_consume = table(time',cdistance','VariableNames',{'Time','CumulativeDistance'})

```

```

figure
subplot(1,3,1)
plot(t,x_coke_t_r)
xlabel('Time (month)')
ylabel('X (m)')
title('Coke thickness (radiation)')
subplot(1,3,2)
plot(t,x_coke_t_conv)
xlabel('Time (month)')
ylabel('X (m)')
title('Coke thickness (convection)')
subplot(1,3,3)
plot(t,Q_total)
xlabel('Time (month)')
ylabel('Q (Watt)')
title('Fuel consumption')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Function xcoke

```

function dxdt =
xcoke(time,x,MW,V_furnace,density_coke,A_tubei,C,r_tubei,L_tube,k1,k_r)
a=sum(x);
xc = ((-2*r_tubei)+sqrt(((2*r_tubei)^2)-(4*0.01*(r_tubei^2))))/(-2); %coke thickness
@cat = 0 (maximum coke)
Vc = pi*L_tube*((r_tubei^2)-((r_tubei-xc)^2)) ; %coke volume @cat =
0
Vcd = pi*L_tube*((r_tubei^2)-((r_tubei-sum(x))^2)) ;
Ld = Vcd/((pi*(r_tubei^2)-((r_tubei-xc)^2)) ; %develop lenght
Ca1 = 2*pi*r_tubei*Ld ; %coke area when cat still exist
Ca2 = 2*pi*(r_tubei-sum(x))*L_tube ; %coke area when cat doesn't exist
cat = (2*pi*r_tubei*L_tube)-Ca1;

if Ld <= L_tube
    cat = cat;
    Ca = Ca1;
else
    cat = 0;
    Ca = Ca2;
end

r1 = (C(1,1)*(cat)*k_r*0.01)+(C(1,1)*Ca*k1); %rate of coke
formation from crude %UNIT mol component /(m^3 crudeoil * S)
r2 = (C(1,2)*(cat)*k_r*0.1)+(C(1,2)*Ca*k1); %rate of coke
formation from crude %UNIT mol component /(m^3 crudeoil * S)
r3 = (C(1,3)*(cat)*k_r*1)+(C(1,3)*Ca*k1) ; %rate of coke formation
from crude %UNIT mol component /(m^3 crudeoil * S)
r4 = (C(1,4)*(cat)*k_r*10)+(C(1,4)*Ca*k1) ; %rate of coke formation
from crude %UNIT mol component /(m^3 crudeoil * S)
r5 = (C(1,5)*(cat)*k_r*100)+(C(1,5)*Ca*k1) ; %rate of coke formation
from crude %UNIT mol component /(m^3 crudeoil * S)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dxdt(1,1) =
(r1*MW(1,1)*V_furnace/(density_coke*A_tubei))+
(r2*MW(1,2)*V_furnace/(density_coke*A_tubei))+
(r3*MW(1,3)*V_furnace/(density_coke*A_tubei))+
(r4*MW(1,4)*V_furnace/(density_coke*A_tubei))+
(r5*MW(1,5)*V_furnace/(density_coke*A_tubei))
% dxdt(1,1) = r1*MW(1,1)*V_furnace/(density_coke*A_tubei);
% dxdt(2,1) = r2*MW(1,2)*V_furnace/(density_coke*A_tubei);
% dxdt(3,1) = r3*MW(1,3)*V_furnace/(density_coke*A_tubei);
% dxdt(4,1) = r4*MW(1,4)*V_furnace/(density_coke*A_tubei);
% dxdt(5,1) = r5*MW(1,5)*V_furnace/(density_coke*A_tubei);

```

```
end
```

```

%x_coke_naphtha = x_coke_r(:,1)
%x_coke_kerosene = x_coke_r(:,2)
%x_coke_LGO     = x_coke_r(:,3)
%x_coke_HGO     = x_coke_r(:,4)
%x_coke_residue = x_coke_r(:,5)

```

### Function constant

```

function error = constant(int)
r_tubei      = 0.048; %m
L_tube       = 3.4;
MW           = [106.428 169.481 228.121 278.165 594.377]; %m
component
V_furnace_r  = (96)*pi*(r_tubei^2)*L_tube; %m^3 --> 96 = No. tube
density_coke = 900; %kg/m^3
C            = [4.307e-3 1.164e-3 1.097e-3 5.137e-4 2.374e-3]; %mol/lit
(concentration of each component)
A_tubei      = 2*pi*(r_tubei)*L_tube;

```

```
load('T.mat')
```

```
load('X.mat')
```

```
x0=0
```

```
k1 = int(1)
```

```
k_r = int(2)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
[t x] =
ode15s(@xcoke,T,x0,[],MW,V_furnace_r,density_coke,A_tubei,C,r_tubei,L_tube,k1,k_r);
xx = x(:,1)
```

```
errorX = X-xx
error = sum(errorX.^2)
end
```

### Function cal\_kT

```
function error = cal_kT(para,T_tubei,A_tubeo,Q_crudeoil,deltaX_tube)
```

```
T_tubeo_guess = para(1);
k_tube_guess = para(2);

k_tube_cal = -1.257+432.7*((T_tubei+T_tubeo_guess)/2);
T_tubeo_cal = (Q_crudeoil*deltaX_tube/(k_tube_guess*A_tubeo))+T_tubei;

error(1) = (k_tube_guess-k_tube_cal);
error(2) = (T_tubeo_guess-T_tubeo_cal)/100;

end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลสำหรับสร้างกราฟระหว่างความหนาไค้กและเวลา

ตาราง ค.1 ความหนาไค้กในส่วนการพาความร้อนที่เกิดจากน้ำมันดิบ 5 องศาประกอบ (แนฟทา เคโรซีน แก๊สออย์เบา แก๊สออย์หนัก และ กากน้ำมัน) และจาก 4 องศาประกอบ (กรณีไม่มีกากน้ำมัน)

เวลา (เดือน)	ไค้กจาก 5 องศาประกอบ (เมตร)	ไค้กจาก 4 องศาประกอบ(เมตร)
1	0.00000	0.00000
2	0.00007	0.00000
3	0.00048	0.00000
4	0.00272	0.00001
5	0.01368	0.00002
6	0.03025	0.00004
7	0.03819	0.00009
8	0.04256	0.00020
9	0.04499	0.00042
10	0.04633	0.00087
11	0.04707	0.00182
12	0.04748	0.00374
13	0.04771	0.00752
14	0.04784	0.01452
15	0.04791	0.02375
16	0.04794	0.02915
17	0.04797	0.03337
18	0.04798	0.03664
19	0.04799	0.03916
20	0.04800	0.04111
21	0.04800	0.04264
22	0.04800	0.04382
23	0.04800	0.04475

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (เดือน)	โค้กจาก 5 องค์ประกอบ (เมตร)	โค้กจาก 4 องค์ประกอบ(เมตร)
24	0.04800	0.04604
25	0.04800	0.04648
26	0.04800	0.04681
27	0.04800	0.04708
28	0.04800	0.04728
29	0.04800	0.04744
30	0.04800	0.04756
31	0.04800	0.04766
32	0.04800	0.04774
33	0.04800	0.04780
34	0.04800	0.04784
35	0.04800	0.04788
36	0.04800	0.04790
37	0.04800	0.04792
38	0.04800	0.04794
39	0.04800	0.04795
40	0.04800	0.04796
41	0.04800	0.04796
42	0.04800	0.04797
43	0.04800	0.04798
44	0.04800	0.04798
45	0.04800	0.04799
46	0.04800	0.04799
47	0.04800	0.04799
48	0.04800	0.04799
49	0.04800	0.04800
50	0.04800	0.04800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

## การคำนวณเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไค้ก (Optimization)

ตารางที่ ง.1 ตารางแสดงค่าในการคำนวณเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไค้ก (Optimization)

เวลาดำเนินการเตาเผา (เดือน)	ปริมาณเชื้อเพลิง (จูล/ปี)	ค่าเชื้อเพลิง (บาท/ปี)	จำนวนที่ทำความ สะอาด (ครั้ง/ปี)	ค่าทำความสะอาด (บาท/ปี)	รายได้ที่สูญเสีย (บาท/ปี)	ค่าใช้จ่าย ทั้งหมด (บาท/ปี)
0	0	0	0.000	0	0	0
1	284,066,702,567,393	67,310,821	12.000	4,197,111	92,480,543,899	92,552,051,831
2	3,387,167,340,825,260	802,603,799	6.000	2,098,555	46,240,271,950	47,044,974,304
3	13,529,064,032,900,300	3,205,769,628	4.000	1,399,037	30,826,847,966	34,034,016,631
4	27,068,821,491,183,900	6,414,073,109	3.000	1,049,278	23,120,135,975	29,535,258,362
5	39,910,159,585,876,700	9,456,883,132	2.400	839,422	18,496,108,780	27,953,831,334
6	51,189,255,717,650,600	12,129,513,236	2.000	699,518	15,413,423,983	27,543,636,738
7	60,379,743,770,175,400	14,307,238,716	1.714	599,587	13,211,506,271	27,519,344,575
8	67,799,543,463,506,700	16,065,392,011	1.500	524,639	11,560,067,987	27,625,984,637
9	73,824,277,048,888,000	17,492,978,420	1.333	466,346	10,275,615,989	27,769,060,755
10	78,769,201,334,634,700	18,664,699,395	1.200	419,711	9,248,054,390	27,913,173,496
11	82,877,585,435,802,600	19,638,198,592	1.091	381,556	8,407,322,173	28,045,902,320
12	86,333,174,533,923,300	20,457,015,219	1.000	349,759	7,706,711,992	28,164,076,969
13	89,273,129,279,014,600	21,153,650,079	0.923	322,855	7,113,887,992	28,267,860,926

เวลาดำเนินการเตาเผา (เดือน)	ปริมาณเชื้อเพลิง (จูล/ปี)	ค่าเชื้อเพลิง (บาท/ปี)	จำนวนที่ทำความ สะอาด (ครั้ง/ปี)	ค่าทำความสะอาด (บาท/ปี)	รายได้ที่สูญเสีย (บาท/ปี)	ค่าใช้จ่าย ทั้งหมด (บาท/ปี)
14	91,800,905,864,908,800	21,752,617,560	0.857	299,794	6,605,753,136	28,358,670,489
15	93,995,508,639,016,400	22,272,638,080	0.800	279,807	6,165,369,593	28,438,287,481
16	95,917,804,017,554,300	22,728,134,198	0.750	262,319	5,780,033,994	28,508,430,511
17	97,615,243,919,873,700	23,130,349,848	0.706	246,889	5,440,031,994	28,570,628,731
18	99,124,854,328,943,800	23,488,058,495	0.667	233,173	5,137,807,994	28,626,099,663
19	100,475,984,251,823,000	23,808,214,514	0.632	220,901	4,867,397,047	28,675,832,461
20	101,692,264,045,407,000	24,096,417,216	0.600	209,856	4,624,027,195	28,720,654,267
21	102,792,911,982,579,000	24,357,220,456	0.571	199,862	4,403,835,424	28,761,255,742
22	103,793,638,468,340,000	24,594,346,880	0.545	190,778	4,203,661,086	28,798,198,744
23	104,707,384,384,697,000	24,810,862,886	0.522	182,483	4,020,893,213	28,831,938,582
24	105,544,939,061,234,000	25,009,325,051	0.500	174,880	3,853,355,996	28,862,855,927
25	106,315,456,276,068,000	25,191,902,403	0.480	167,884	3,699,221,756	28,891,292,043
26	107,026,705,096,010,000	25,360,435,855	0.462	161,427	3,556,943,996	28,917,541,279
27	107,685,250,608,764,000	25,516,481,033	0.444	155,449	3,425,205,330	28,941,841,811
28	108,296,723,189,052,000	25,661,372,078	0.429	149,897	3,302,876,568	28,964,398,543
29	108,865,993,641,991,000	25,796,263,148	0.414	144,728	3,188,984,272	28,985,392,149
30	109,397,296,731,544,000	25,922,157,690	0.400	139,904	3,082,684,797	29,004,982,390
31	109,894,313,641,052,000	26,039,927,974	0.387	135,391	2,983,243,352	29,023,306,716
32	110,360,261,114,178,000	26,150,336,222	0.375	131,160	2,890,016,997	29,040,484,378

เวลาดำเนินการเตาเผา (เดือน)	ปริมาณเชื้อเพลิง (จูล/ปี)	ค่าเชื้อเพลิง (บาท/ปี)	จำนวนที่ทำความ สะอาด (ครั้ง/ปี)	ค่าทำความสะอาด (บาท/ปี)	รายได้ที่สูญเสีย (บาท/ปี)	ค่าใช้จ่าย ทั้งหมด (บาท/ปี)
33	110,797,965,637,218,000	26,254,052,182	0.364	127,185	2,802,440,724	29,056,620,091
34	111,209,920,772,641,000	26,351,666,714	0.353	123,444	2,720,015,997	29,071,806,156
35	111,598,335,085,866,000	26,443,703,148	0.343	119,917	2,642,301,254	29,086,124,320
36	111,965,172,285,368,000	26,530,626,793	0.333	116,586	2,568,903,997	29,099,647,376
37	112,312,183,722,891,000	26,612,852,638	0.324	113,435	2,499,474,159	29,112,440,233
38	112,640,933,887,775,000	26,690,751,397	0.316	110,450	2,433,698,524	29,124,560,371
39	112,952,826,194,265,000	26,764,655,614	0.308	107,618	2,371,295,997	29,136,059,229
40	113,249,125,139,550,000	26,834,864,917	0.300	104,928	2,312,013,597	29,146,983,442
41	113,530,971,858,710,000	26,901,649,703	0.293	102,369	2,255,623,022	29,157,375,094
42	113,799,398,770,584,000	26,965,254,609	0.286	99,931	2,201,917,712	29,167,272,252
43	114,055,341,790,801,000	27,025,901,403	0.279	97,607	2,150,710,323	29,176,709,334
44	114,299,651,627,385,000	27,083,791,665	0.273	95,389	2,101,830,543	29,185,717,597
45	114,533,103,656,794,000	27,139,109,122	0.267	93,269	2,055,123,198	29,194,325,589
46	114,756,405,801,906,000	27,192,021,521	0.261	91,242	2,010,446,607	29,202,559,369
47	114,970,205,732,238,000	27,242,682,330	0.255	89,300	1,967,671,147	29,210,442,777
48	115,175,097,270,411,000	27,291,232,257	0.250	87,440	1,926,677,998	29,217,997,694
49	115,371,625,809,115,000	27,337,800,535	0.245	85,655	1,887,358,039	29,225,244,229
50	115,560,293,059,617,000	27,382,506,048	0.240	83,942	1,849,610,878	29,232,200,868