

DESIGN AND DEVELOPMENT OF SCROLL EXPANDER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-030-107

DESIGN AND DEVELOPMENT OF SCROLL EXPANDER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะภายในเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-M-030-107



COPYRIGHT 2018

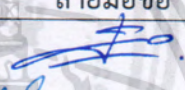


FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

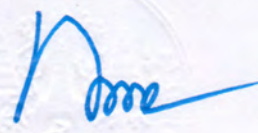
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและพัฒนาสคอลเอ็กซ์แพนเดอร์
Thesis Title Design and Development of Scholl Expander
นักศึกษา นายกฤษฎา หล่อรังษี
รหัสประจำตัว 56601145
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-030-107

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุยนันท์	
รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	
ผศ.ดร.อนุรัตน์	พิณโสภณ	
ผศ.ดร.เอกพจน์	ตันตราภิวัดน์	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561 เวลา 10.30-12.30 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

ฉบับนี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่
นอกวงจำกัด หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
วันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อหัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาสกอลเอ็กซ์แพนเดอร์
นักศึกษา	นายกฤษฎา หล่อรังษี
รหัสประจำตัว	56601145
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

บทคัดย่อ

วัฏจักรออร์แกนิกแรนคิน (Organic Rankine Cycle, ORC) เป็นเทคโนโลยีที่เพิ่งถือกำเนิดขึ้น สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากการนำความร้อนกลับมาใช้งานจากความต่างของอุณหภูมิ ในการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบ ORC ในระดับ 1 – 10 กิโลวัตต์นั้น ยากที่จะหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่จะทำหน้าที่ขยายแก๊ส ลดความดัน และเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกล จากการพิจารณาทฤษฎีอุณหพลศาสตร์และกลศาสตร์ จะเห็นได้ชัดว่า กลไกสกอลจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไฟฟ้าในระดับกิโลวัตต์ ด้วยเหตุที่ว่า มันสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้อัตราการไหลเชิงมวลที่สูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาสกอลเอ็กซ์แพนเดอร์ เพื่อที่จะให้สัดส่วนปริมาตรของอุปกรณ์ (ปริมาตรคายต่อปริมาตรดูด) สูงที่สุด ด้วยการใช้สูตรสกอลความหนาแน่นที่จากงานก่อนหน้า ในการศึกษาการออกแบบนี้ รัศมีฐานและมุมภายในสันสุดของอินโวลูท จะถูกเลือกเป็นตัวแปรที่ใช้ออกแบบ ตลอดจนวิธีเกรเดียนเบสและวิธีไคเร็กซ์จะถูกใช้สำหรับอัตราขยายสูงสุดด้วย นอกจากนี้ เเงื่อนไขต่างๆอันได้แก่ รัศมีลายสกอลไม่เกิน 90 มม. อยู่ภายใต้สัดส่วนการชะลุดของความสูงสกอลและค่าสัดส่วนความสูงสกอลต่อรัศมีฐานไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ ก็จะรวมอยู่ในการออกแบบด้วย ผลการออกแบบแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรของอุปกรณ์เป็น 5.1755 ซึ่งดีกว่าค่าของสกอลเอ็กซ์แพนเดอร์มาตรฐานที่ 3.9061 ดังนั้นจึงนำไปสู่ การเพิ่มประสิทธิภาพสัดส่วนปริมาตรของอุปกรณ์ถึง 44.3% ผลลัพธ์ที่ได้จากงานนี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการแรกของการออกแบบระบบ ORC เพื่อที่จะใช้เครื่องเอ็กซ์แพนเดอร์ในพิภพขนาดที่ต้องการให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จึงต้องออกแบบสัดส่วนเชิงปริมาตรของระบบให้สอดคล้องด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการพิสูจน์การทำงานของกลไกด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อแสดงที่ให้เห็นว่าสกอลเอ็กซ์แพนเดอร์ที่ได้ออกแบบนี้ สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างราบรื่นและปราศจากการติดขัดแต่อย่างใด ท้ายสุดได้

นำเสนอวิธีคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) มาสาธิตวิธีการผลิตสกรู
เอ็กซ์แพนเดอร์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตได้จริง



Thesis title	Design and Development of Scroll Expander
Student	Mr. Kritsada Lowrungsi
Student ID	56601145
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2018
Thesis advisor	Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn

Abstract

The Organic Rankine Cycle (ORC) is an emerging technology for power generation through heat recovering from different thermal sources. In the 1-10 kW ORC power generation, it is difficult to find the suitable equipment to expand the gas, reduce pressure and converse heat to be mechanical energy. Considering from thermodynamics and mechanics principle, it is obviously found that the scroll mechanism is the most suitable for kW scale power generation. The reason for this is that it can operate without the high mass flow rate condition. This thesis presents the design and development of scroll expander to assess the maximum built-in volume ratio (discharge volume / suction volume). Using fixed thickness scroll formulas from the previous work, in this design study, the base radius and inner ending involute angle were chosen to be design variables and the gradient-based methods and the direct search methods were utilized to search for the maximum expansion ratio. Additionally, some of constraints such as scroll wrap radius within 90, within slenderness ratio of scroll height and over the minimum scroll height / base radius ratio were also included in the design. The design result exhibits that built-in volume ratio is 5.7155 which is better than the standard scroll expander, 3.9061. Therefore, this leads to 44.3% improvement of build-in volume ratio. The results of this work can be considered as the first process of ORC system design to maximize performance of expander machine within the desired dimension, the system volume ratio need to be corresponding. Furthermore, the mechanism has been proved from the motion simulation. This shows the designed scroll expander can be working with the smooth operation and without any disruption. Finally,

Computer Aided Manufacturing, CAM has been introduced to shows the scroll expander machining for the real production.



Acknowledgement

I would like to thanks Asst. Prof Dr. Monsak Pimsarn (Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang) who provided me the chance to develop myself in this program, a lot of sustained guidance, many indispensable advices and reviews. Completion of my thesis may not be achieved with their supports and advices.

Kritsada Lowrungsi



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents

	Page
Abstract	IV
Acknowledgements	VI
Contents	VII
List of Tables	X
List of Figures	XI
Nomenclature and Notations	XIII
CHAPTER 1 Introduction	1
1.1 Statement and significance of problems	1
1.2 Objectives	1
1.3 Scope and limitations	2
1.4 Research questions	2
1.5 Hypothesis	3
1.6 Expectations	3
1.7 Research methodology	3
CHAPTER 2 Literature Review and Related Theories	5
2.1 Associated researches	5
2.2 Related theories	5
2.2.1 Organic Rankine Cycle	5
2.2.2 Scroll Compressor and Scroll Expander	6
2.3 Geometric Models of Scroll Wrap	7
2.4 Working Chamber Models of Scroll Pair	10
2.4.1 Suction Chamber	12
2.4.2 Compression Chamber	13
2.4.3 Discharge Chamber	14
2.5 Optimization Methodology	16
2.5.1 Mathematical Model	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ **IX** ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents (Cont.)

	Page
CHAPTER 3 Research Methodology	18
3.1 Geometric Parameters of Scroll Expander	18
3.1.1 Scroll Wrap Definition	18
3.1.2 Derived Terms	20
3.2 Optimum Design for the Maximum Power	20
3.2.1 Objective function	20
3.2.2 Constraint conditions	21
3.2.3 Software Implementation Process	22
CHAPTER 4 Result	25
4.1 Optimum Result	25
4.2 Data Validation	29
4.3 Sensitivity Analysis	30
4.4 Derivation of Scroll Wrap Program	31
4.5 Create Scroll Expander Shape in CAD	33
4.5.1 Create 3 dimensions of Scroll Expander Wrap	33
4.5.2 Create the 4 key parts of Scroll Mechanism and Assembly Simulation	35
4.6 Create Scroll Expander Manufacturing Process in CAM	49
4.6.1 Create CAM files of 4 key parts by ZW3D	49
CHAPTER 5 Conclusion and Suggestion	54
5.1 Conclusion	54
5.2 Suggestion	55
Reference	56
Appendix	59
Appendix A. Optimum Design for the Maximum Power Program	60
Appendix B. The Pair of Scroll Wrap Program	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents (Cont.)

	Page
Appendix C. The Data Table of a Scroll Wrap Program	80
Appendix D. Publication	99
Author Biography	108



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ**XI**ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

List of Tables

	Page
Table. 4.1 Size dimension of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model	26
Table. 4.2 Angle dimension of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model	26
Table. 4.3 Performance of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model	27
Table. 4.4 Comparing expansion ratios in the same shape (t_s , h_s and R_{oe}) between current ORC scroll expander research with optimum design model	27



List of Figures

	Page
Fig. 2.1 Expressions of the inner involute and outer involute	8
Fig. 2.2 Schematic of the interaction arc	10
Fig. 2.3 Schematic of area calculation	11
Fig. 2.4 Schematic of volume calculation of suction chamber	12
Fig. 2.5 Schematic of discharge chamber	14
Fig. 2.6 Definition of expander working chamber	15
Fig. 2.7 Evolution of the volume of the different chambers with the crank angle	16
Fig. 3.1 Basic terminology of scroll involute	18
Fig. 3.2 Derivation of scroll expander wrap	19
Fig. 3.3 Working process of a scroll expander	20
Fig. 3.4 Work flow of the calculation processes	22
Fig. 3.5 Coding of Optimum Design part 1	23
Fig. 3.6 Coding of Optimum Design part 2	24
Fig. 4.1 Isometric perspective of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle	25
Fig. 4.2 Contour of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle	26
Fig. 4.3 Under/over expansion losses	28
Fig. 4.4 Data Validation Result	29
Fig. 4.5 Sensitivity Analysis Result of $t_s = 3, 3.5$ and 4 mm	30
Fig. 4.6 Sensitivity Analysis Result of $t_s = 5, 5.5$ and 6 mm	31
Fig. 4.7 Sample of code for Orbiting Scroll Wrap	32
Fig. 4.8 Counter Clock Wise Turning of Moving Scroll (Green)	33
Fig. 4.9 Sample of Transition Curve Points	34
Fig. 4.10 Scroll Expander Wrap in 3 dimensions	35
Fig. 4.11 The scroll mechanism	36
Fig. 4.12 2 dimensions cross section of scroll pair	37
Fig. 4.13 3 dimensions cross section of scroll pair	37

List of Figures (Cont.)

	Page
Fig. 4.14 Fixed Scroll Expander model (Front)	38
Fig. 4.15 Fixed Scroll Expander model (Back)	38
Fig. 4.16 Orbiting Scroll Expander model (Front)	39
Fig. 4.17 Orbiting Scroll Expander model (Back)	39
Fig. 4.18 Oldham Joint model	40
Fig. 4.19 Thrust Bearing model	40
Fig. 4.20 Journal Bearing	41
Fig. 4.21 Generator Shaft	41
Fig. 4.22 Main Bearing and Housing	41
Fig. 4.23 Assembly of Scroll Expander model (bottom up)	42
Fig. 4.24 Assembly of Scroll Expander model (top down)	42
Fig. 4.24 Assembly of Scroll Expander model (top down)	42
Fig. 4.25 Description of preferred fits (ANSI B4.2)	43
Fig. 4.26 Bottom view of Scroll Expander assembly	44
Fig. 4.27 Describe the Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander	45
Fig. 4.28 Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander in 0 – 105 degree	46
Fig. 4.29 Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander in 120 – 225 degree	47
Fig. 4.30 Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander in 240 – 345 degree	48
Fig. 4.31 Create stock of raw material	49
Fig. 4.32 Top Facing operation	49
Fig. 4.33 The rework of Spiralcut operation	50
Fig. 4.34 Solid Verify of Fixed Scroll Expander (Front)	50
Fig. 4.35 Solid Verify of Fixed Scroll Expander (Back)	51
Fig. 4.36 Solid Verify of Orbiting Scroll Expander (Front)	51
Fig. 4.37 Solid Verify of Orbiting Scroll Expander (Back)	51
Fig. 4.38 Solid Verify of Oldham Joint (Front)	52
Fig. 4.39 Solid Verify of Thrust Bearing (Front)	52
Fig. 4.40 Some NC code of Fixed Scroll Expander (Front)	53

Nomenclature and Notations

Symbols

A	Area	mm^2
F	Flow correction parameter	-
h_s	Scroll height	mm
N	Number of	-
r_b	Base circle radius	mm
r_o	Orbiting Radius	mm
t_s	Scroll thickness	mm
x	x - Coordinate	mm
y	y - Coordinate	mm
φ^*	Effective involute angle	rad
φ	Involute angle	rad
δ	Gap width	mm
V_{disp}	Displacement Volume	mm^3
$2V_{c,d}$	Inner Chamber Volume	mm^3
V_{ratio}	Volume ratio	-
R_{oe}	Scroll Radius	mm
\dot{W}	Power	kW
\dot{m}	Mass flow rate	kg/s
h	Enthalpy	kJ/kg
η	Efficiency	-
CAD	Computer Aided Design	-
CAM	Computer Aided Manufacturing	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Subscripts

0

s

e

i0

is

ie

o0

os

oe

exp

mec

in

out

s

th

V

Initial

Starting

Ending

Inner initial

Inner starting

Inner ending

Outer initial

Outer starting

Outer ending

Expander

Mechanical

Inlet

Outlet

Isentropic

Theoretical

Volumetric



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chapter 1

Introduction

1.1 Statement and significance of problems

The low grade waste heat recovery (temperature lower than 200 °C) from cold and hot cycle for power generation is one of the system efficiency improvements. Various technologies had been introduced with this waste heat but the result was not satisfied. Even though the new emerging technology for this waste heat level has been invented, one of the technology so-called Organic Rankine Cycle (ORC) is the Rankine cycle which use organic fluid instead of ordinary water to be convective heat transfer media in the system. This can be the most popular alternative. The organic substance which has been chosen is our well known fluid, refrigerant, in regard to required temperature and phase. R245fa is the most preferable because the narrow phase transition energy and suitable temperature level.

In this cycle, electric generators will be driven by a prime mover. Expansion machines have been used in this function which can be classified in 2 types, turbo machines and positive displacement expanders for the high and low gas flow rate accordingly.

The aim of the present paper is to determine the positive displacement mechanism, scroll expander which is suitable for the low mass flow rate (lower than 1 kg/s) for low grade waste heat recovery. These mass flow rate and temperature can be applied with the waste heat of factory and building by using the concept of optimum design to choose the suitable dimensions of scroll expander for the maximum built-in volume ratio. By setting up the assumption of built-in volume ratio varied to the number of involute cycle, this leads to establish the key variable to be inner ending angle, φ_{ie} and base circle radius, r_b .

1.2 Objectives

1. The purpose of this research is to find the optimum dimensions of scroll expander wrap which satisfy the maximum built-in volume ratio for the same diameter and height as the reference scroll.

2. To achieve this objective, it is necessary to concern all feasible constraint conditions of scroll geometry. The solution from optimization methodology leads to develop the new scroll wrap and its prototype.

3. In order to achieve this, the new program in Wolfram Mathematica software has been created which can plot any type of scroll wrap from scroll geometry theory.

4. According to create 3 dimensions model, the set of 2 dimensions coordinates from Wolfram Mathematica have to be transferred to CAD software, Solidworks.

5. Then uses Solidworks to develop 4 key parts of scroll mechanism, fixed scroll, orbiting scroll, Oldham joint and thrust bearing.

6. The last process is to create machining process of scroll expander in CAM software, ZW3D.

1.3 Scope and limitations

1. In this research, the author uses standard scroll expander of Wincent Lemort [4] in the same diameter and height for the reference.

2. In this research, Wolfram Mathematica software is used to find the optimum solution and create scroll wrap.

3. In this research, Solidworks software is used to develop scroll expander model.

4. In this research, ZW3D software is used to create scroll expander machining process.

1.4 Research questions

Firstly, how to find the better for maximum power output of scroll expander wrap compare with the standard scroll wrap of Wincent Lemort [4]?

Secondly, how to create the best performance scroll expander wrap and make it to be 3 dimensions model in CAD file?

Finally, how to develop model to be the prototype in CAM file?

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 Hypothesis

Firstly, the brake horse power is increases with the increase of pressure ratio and pressure ratio varied with built-in volume ratio. In regard to find the maximum power output, to maximize the built-in volume ratio is to be the solution.

Finally, the optimum solutions will provide the optimum shape of scroll expander wrap and its model.

1.6 Expectations

1. To understand the scroll geometry, the mechanism of scroll pair and the most influential factors that impact to scroll wrap design.
2. To predict and set up all constraint conditions to control the optimum procedure.
3. To apply optimization methodology and Wolfram Mathematica command to find the optimum solution.
4. To develop Wolfram Mathematica program to plot all scroll wrap.
5. Uses Solidworks to develop the 4 key parts of scroll expander model which is the hearth of scroll mechanism in 3 dimensions CAD file.
6. Creates the assembly simulation to build the smooth motion in CAD file.
7. Uses ZW3D to develop the 4 key parts of scroll expander model in CAM file.

1.7 Research methodology

In regard to this research requires the deep understanding in the scroll geometry and the mechanism of scroll pair. The author had studied the plenty of related research papers before design the new methodology to find the best shape of scroll expander wrap for the maximum built-in volume ratio. Furthermore, this research is chooses r_b and φ_{ie} to be the

variables to find the maximum volume ratio by gradient-based methods before uses the solutions to plot scroll expander wrap. After that, develops the 4 key parts of scroll expander model which is the hearth of scroll mechanism in 3 dimensions CAD file then shows the manufacturing in CAM file.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chapter 2

Literature Review and Related Theories

2.1 Associated researches

Scroll theory has been invented by Leon Creux on 1905 [1]. But it was impossible to produce a working pair of scrolls until the middle 1970's due to a very small tolerance required [2]. After that, the scroll compressor become more and more popular because of its unique advantages, low level of noise, high efficiency and high reliability.

The geometry of scroll compressor is one of the main factors affecting the efficiency of the compressor. The geometry of the scroll has to be completely understood in order to establish a thermodynamic model.

The wraps of scrolls directly affect the built-in compression ratio and the performance of the compressor. Many researchers have done a lot of work in this field which emphasis on the inner portion because the outer portion of the scroll wraps is the involute and simple. Furthermore, many following papers described the development of geometrical scroll model from this basis until Baolong Wang [2] was develop the scroll wrap model which have thickness variable inside.

At this stage, the new formula of working chamber volume has been developed based on discretional initial angles of involute. And the expression of the volume during all the suction, compression and discharge processes in a general subsection function are disclosure too.

After that, the paper "Derivation of Optimal Scroll Compressor Wrap for Minimization of Leakage Losses" by Ian H. Bell [3] uses this concept to develop volume ratio by substitute depth and inner ending angle in this ratio. By using fixed displacement volume (suction volume of scroll compressor or discharge volume of scroll expander), set up radial loss and leakage loss have the formula belonged to inner ending angle then calculate the minimum total loss by Python software.

2.2 Related theories

2.2.1 Expanders in Organic Rankine Cycle

The low grade waste heat recovery (Temperature lower than 200 °C) from cold and hot cycle for power generation is another one of system efficiency improving. Various technologies had been introduced with this waste heat but the result is not satisfied. Even

though the new emerging technology for this waste heat level have been invented. The Organic Rankine Cycle (ORC) is the Rankine cycle which use organic fluid instead of ordinary water to be convective heat transfer media in the system. Thus, this is the most popular alternative at this time. The organic substance which has been chosen is our well known fluid, refrigerant, in regard to required temperature and phase. R245fa is the most preferable because the narrow phase transition energy and suitable temperature level.

In this cycle, electric generators will be driven by prime mover. Expansion machines have been used in this function which can be classified in 2 types, turbo machines and positive displacement expanders for the high and low gas flow rate accordingly.

In this thesis, the author will focus to the positive displacement mechanism, scroll expander which is suitable for the low mass flow rate (lower than 1 kg/s) for low grade waste heat recovery. These mass flow rate and temperature can be applied with the waste heat of factory and building by using the concept of optimum design to choose the suitable dimensions of scroll expander for the maximum built-in volume ratio (discharge volume / suction volume). By set up the assumption of volume ratio varied to the number of involute cycles, leads to establish the key variable to be inner ending angle, φ_{ie} and base circle radius, r_b .

2.2.2 Scroll Compressor and Scroll Expander

In field of rotating machinery, machines are separated in two types. One is turbo mechanism and another is positive displacement mechanism. The last one can working in low mass flow rate condition. The major types of positive displacement compressor are reciprocating, vane, screw and scroll compressors. In contrast with most piston compressor (reciprocating), rotary compressor (vane, screw and scroll) do not need valves. The timing of the suction and discharge processes is imposed by the geometry of the machinery [13].

Thus, different than reciprocating technology with many moving parts, the scroll compressor has one scroll or spiral orbiting in path defined by a matching fixed scroll. The fixed scroll is attached to the compressor body. The orbiting scroll is couple to the crankshaft in orbit then rotated. The orbiting motion creates a series of gas pockets traveling between the two scrolls. On the outer portion of the scroll the pocket draw in gas, move it to center

of the scroll where it's discharged. As the gas moves in the increasing smaller inner pocket, the temperature and pressure increase to the desired discharged pressure [14].

Almost all scroll expanders that have been used up to now are prototypes, often derived from existing scroll compressors. In such a reverse route of compressor, the decrease of the pressure is caused by an increase of the volume of the expansion chamber. The ratio between the volume of the expansion chamber at the end of the expansion and the beginning is called "volume ratio (build-in volume ratio), V_{ratio} ". The expansion process of a scroll expander: high pressure gas is admitted at the center and trapped in a pocket that is progressively expanded while travelling in a pocket that is progressively expanded while traveling to the periphery, where the low pressure gas is finally discharged [13].

2.3 Geometric Models of Scroll Wrap

In regard to prevent the fixed of the scroll thickness in geometric models, the discretional initial angle has been established.

The scroll wrap shape is an involute of a circle. From the governing equation of involute, the distance of the point on the involute to its tangent point on the base circle belonged to this differential relation:

$$\frac{\partial L(\varphi)}{\partial \varphi} = a \quad (2.1)$$

Therefore, the Cartesian's coordinates of the point on the involute with a zero involute initial angle can be described as the follow:

$$x = a(\cos(\varphi) + \varphi \sin(\varphi)) \quad (2.2)$$

$$y = a(\sin(\varphi) - \varphi \cos(\varphi))$$

If the initial angle of the involute is considered in Fig.1, the Cartesian's coordinates of the point on the inner and outer involute are:

$$x_i = a(\cos(\varphi_i + \alpha_i) + \varphi_i \sin(\varphi_i + \alpha_i)) \quad (2.3)$$

$$y_i = a(\sin(\varphi_i + \alpha_i) - \varphi_i \cos(\varphi_i + \alpha_i))$$

$$x_o = a(\cos(\varphi_o + \alpha_o) + \varphi_o \sin(\varphi_o + \alpha_o))$$

$$y_o = a(\sin(\varphi_o + \alpha_o) - \varphi_o \cos(\varphi_o + \alpha_o))$$

Consider a scroll compressor with discretional initial angles of involute, the expression of the discharge angle is different from the one with a symmetric initial angle [20]:

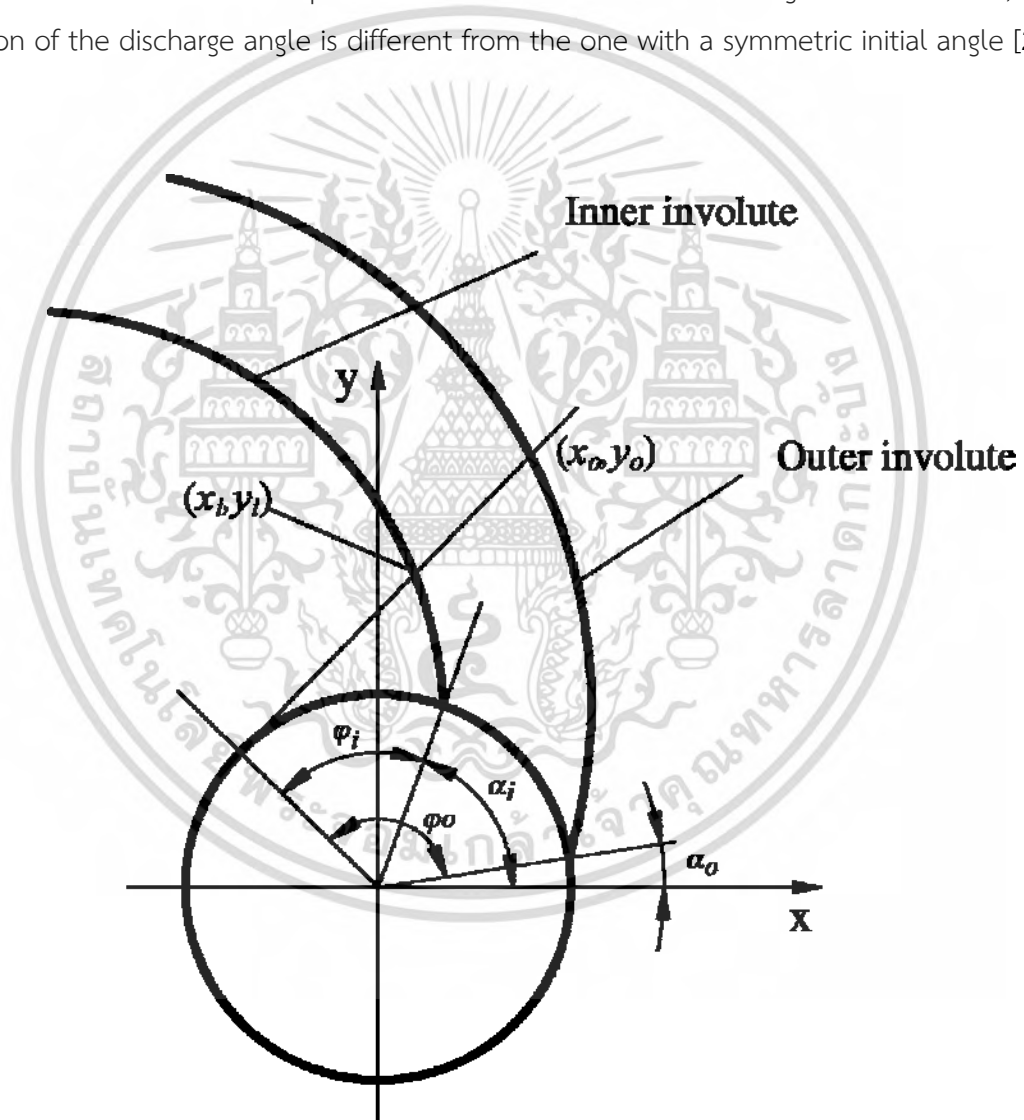


Fig. 2.1 Expressions of the inner involute and outer involute, reprinted from [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \varphi_o^{*2} + 2\varphi_o^* \sin\left(\varphi_o^* - \frac{\alpha_i - \alpha_o}{2}\right) + 2\cos\left(\varphi_o^* - \frac{\alpha_i - \alpha_o}{2}\right) &= \left(\pi - \frac{\alpha_i - \alpha_o}{2}\right)^2 - 2 \\ \theta^* &= \frac{3}{2}\pi - \varphi_o^* - \alpha_o \end{aligned} \quad (2.4)$$

Therefore, the scroll wrap with discretional initial angles of involute are produced as following:

Outer involute:

$$x_o = a(\cos(\varphi_o + \alpha_o) + \varphi_o \sin(\varphi_o + \alpha_o)) \quad (2.5)$$

$$y_o = a(\sin(\varphi_o + \alpha_o) - \varphi_o \cos(\varphi_o + \alpha_o))$$

$$\text{when } \varphi_{out,start} < \varphi_o < \varphi_e - \alpha_o$$

Inner involute:

$$x_i = a(\cos(\varphi_i + \alpha_i) + \varphi_i \sin(\varphi_i + \alpha_i)) \quad (2.6)$$

$$y_i = a(\sin(\varphi_i + \alpha_i) - \varphi_i \cos(\varphi_i + \alpha_i))$$

$$\text{when } \pi - \frac{\alpha_i - \alpha_o}{2} < \varphi_i < \varphi_e - \alpha_i$$

Interaction arc:

$$x_{circle} = R \cos(\varphi_{circle}) + x_{circle,0} \quad (2.7)$$

$$y_{circle} = R \sin(\varphi_{circle}) + y_{circle,0}$$

$$\text{when } \tan^{-1}\left(\frac{y_{inter} - y_{circle,0}}{x_{inter} - x_{circle,0}}\right) < \varphi_{circle} < \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_i - \alpha_o}{2}$$

$x_{circle,0}, y_{circle,0}$ are the coordinates of the center of the intervene arc.

x_{inter}, y_{inter} are the coordinates of the center of the intersection point of the interaction arc and the outer involute (Fig.2). They could be gained from:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_{circle,0} = a \cos\left(\pi + \frac{\alpha_i + \alpha_0}{2}\right) \quad (2.8)$$

$$y_{circle,0} = a \sin\left(\pi + \frac{\alpha_i + \alpha_0}{2}\right)$$

$$(x_{inter} - x_{circle,0})^2 + (y_{inter} - y_{circle,0})^2 = R^2 \quad (2.9)$$

$$x_{inter} = a(\cos(\varphi_{out,start} + \alpha_0) + \varphi_{out,start} \sin(\varphi_{out,start} + \alpha_0))$$

$$y_{inter} = a(\sin(\varphi_{out,start} + \alpha_0) - \varphi_{out,start} \cos(\varphi_{out,start} + \alpha_0))$$

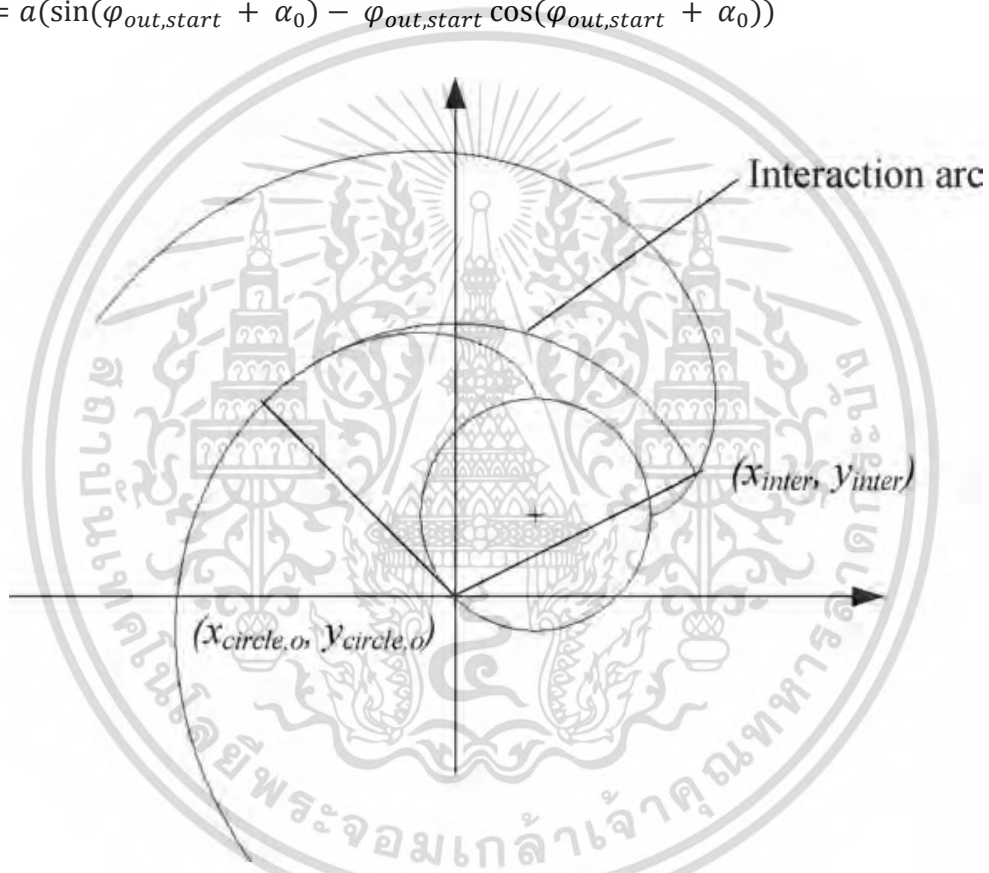


Fig. 2.2 Schematic of the interaction arc,
reprinted from [2]

2.4 Working Chamber Models of Scroll Pair

The continuous process of scroll compressor is composed of suction, compression and discharge from outer to inner of the scroll wraps. Similar as scroll expander is composed of suction, expansion and discharge but in the opposite direction. For this basic theory, this research will use scroll compressor as the model. The change of scroll volume is continuous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and the geometric model of the volume of working chamber should be advanced in a continuous manner.

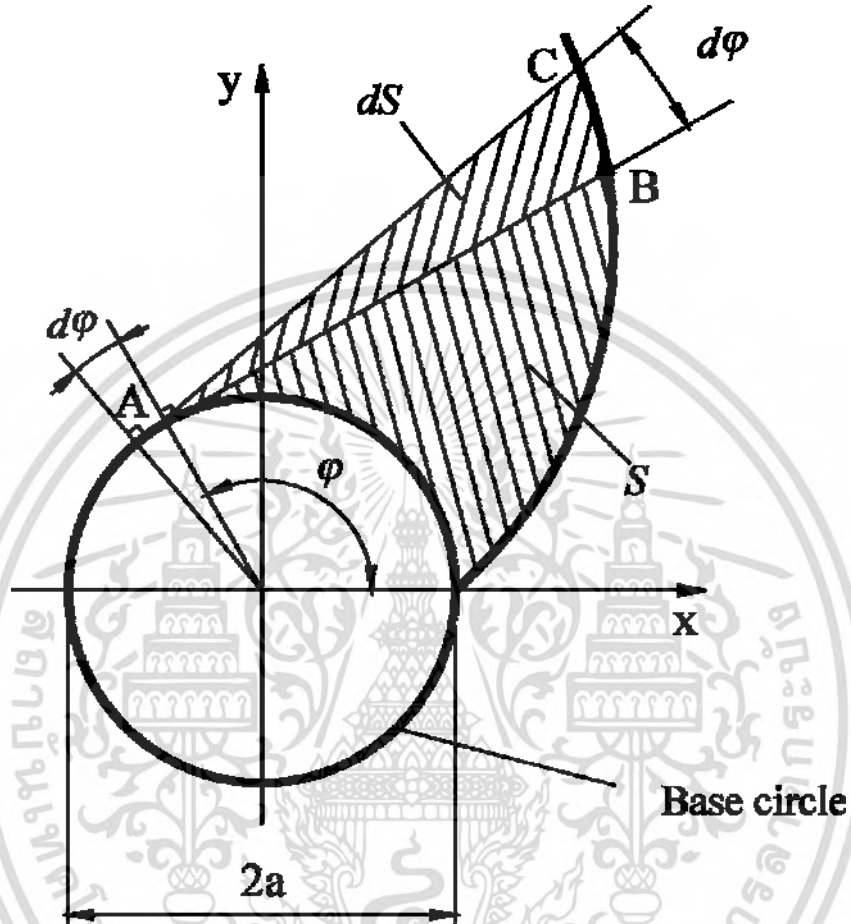


Fig. 2.3 Schematic of area calculation,
reprinted from [2]

The shading area dS in the Fig. 2.3 can be calculated by [20]:

$$dS = \frac{1}{2}L(\varphi)L(\varphi)d\varphi = \frac{1}{2}(a\varphi)^2d\varphi \quad (2.10)$$

Then the whole area S is:

$$S = \int_0^\varphi \frac{1}{2}(a\varphi)^2d\varphi = \frac{1}{6}a^2\varphi^3 \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From this general calculation formula, the volume of each compression chamber can be calculated.

2.4.1 Suction Chamber

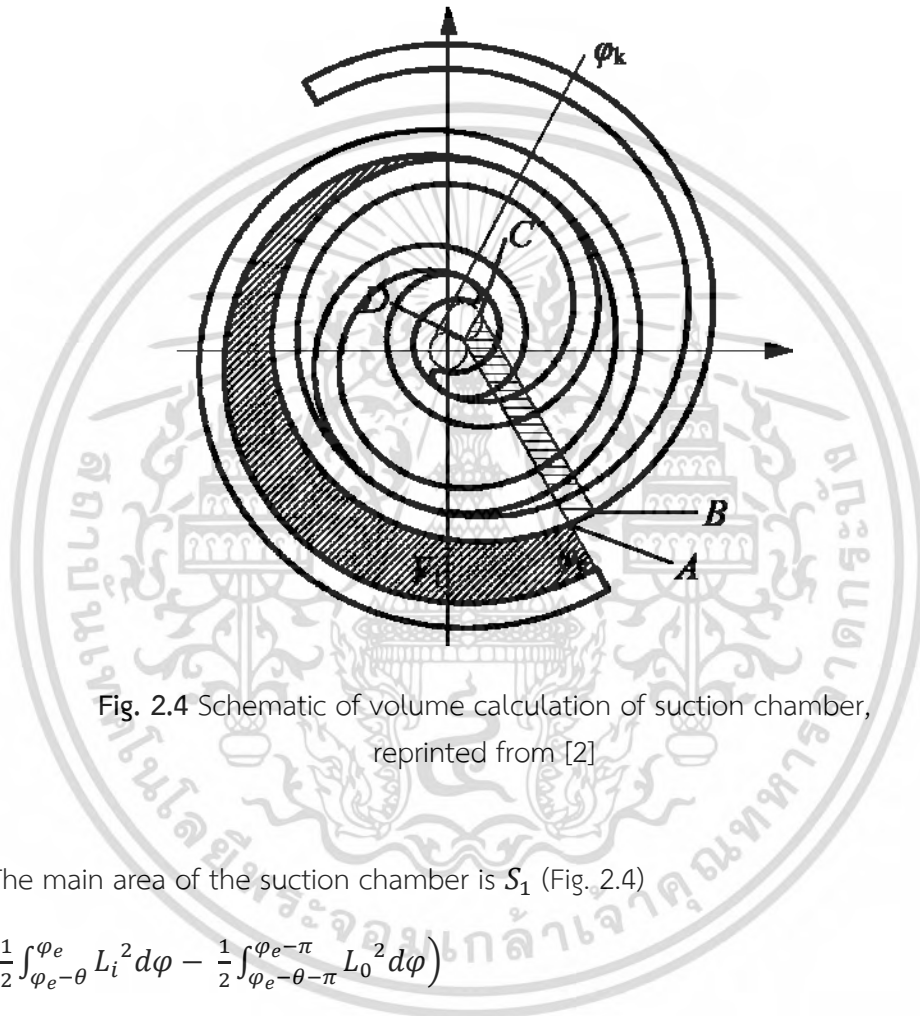


Fig. 2.4 Schematic of volume calculation of suction chamber, reprinted from [2]

The main area of the suction chamber is S_1 (Fig. 2.4)

$$S_1 = h \left(\frac{1}{2} \int_{\varphi_e - \theta}^{\varphi_e} L_i^2 d\varphi - \frac{1}{2} \int_{\varphi_e - \theta - \pi}^{\varphi_e - \pi} L_0^2 d\varphi \right) \quad (2.12)$$

Here, $L_i = a(\varphi - \alpha_i)$ and $L_0 = a(\varphi - \alpha_0)$. So, the main area S_1 is:

$$S_1 = \frac{1}{2} ar(2\theta\varphi_e - \theta^2 - \theta(\alpha_i + \alpha_0 + \pi)) \quad (2.13)$$

Nevertheless, the area S_1 has a difference with the practical suction pocket. The correction area can be calculated as [19]:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_2 = \frac{1}{2} ar \left(2(1 - \cos \theta) - 2(\varphi_e - \pi) \sin \theta - \frac{\pi}{4} \sin 2\theta \right) \quad (2.14)$$

Then, the whole suction volume and its derivative can be derived as:

$$\begin{aligned} V_s &= 2h(S_1 + S_2) \\ &= har[(2\theta\varphi_e - \theta^2 - \theta(\alpha_i + \alpha_0 + \pi)) \\ &\quad + 2(1 - \cos \theta) - 2(\varphi_e - \pi) \sin \theta - \frac{\pi}{4} \sin 2\theta] \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_s}{d\theta} &= har[(2\varphi_e - 2\theta - (\alpha_i + \alpha_0 + \pi)) \\ &\quad + 2 \sin \theta - 2(\varphi_e - \pi) \cos \theta - \frac{\pi}{2} \cos 2\theta] \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$0 < \theta \leq 2\pi$$

2.4.2 Compression Chamber

Same calculation method like suction process, the compression chamber can be derived as following:

$$V_c = 2h \left(\frac{1}{2} \int_{\varphi_e - \theta}^{\varphi_e + 2\pi - \theta} L_i^2 d\varphi - \frac{1}{2} \int_{\varphi_e - 2\pi - \theta}^{\varphi_e + \pi - \theta} L_0^2 d\varphi \right) \quad (2.17)$$

$$V_c = 2\pi har[(2\varphi_e - 2\theta - (\alpha_i + \alpha_0 + \pi))] \quad (2.18)$$

$$\frac{dV_c}{d\theta} = -4\pi har \quad (2.19)$$

$$2\pi < \theta \leq \varphi_e - \frac{5}{2}\pi + \theta^*$$

The θ in this formulation starts from 2π should be mentioned makes the whole volume model be a subsection function style and easier to use in the scroll simulation. If the special initial angles ($\alpha_i + \alpha_0 = 0$) for Yanagisawa's model [16] and ($\alpha_i + \alpha_0 = \frac{\pi}{2}$) for

Halm's model [18] are applied in function (2.18). (Need to pay attention to the different starting angle of θ).

2.4.3 Discharge Chamber

The two areas: V_d (V_{d1} and V_{d2}) and V_{da} (Fig. 2.5) are used in discharge process. For pocket 1 (V_{d1}), the main throttling phenomena happens at A_{d1} , same as pocket 2 (V_{d2}), the main throttling phenomena appears at A_{d2} , the both are decided by the shape of the scroll and the orbiting angle. Because A_{d1} and A_{d2} is too small compare with V_d (V_{d1} and V_{d2}), then it will be neglected. And the central region V_{da} is treated as outer of discharge port. Baolong Wang [2] use $2(V_{d1})$ as the volume of the discharge which different from Chen's [19].

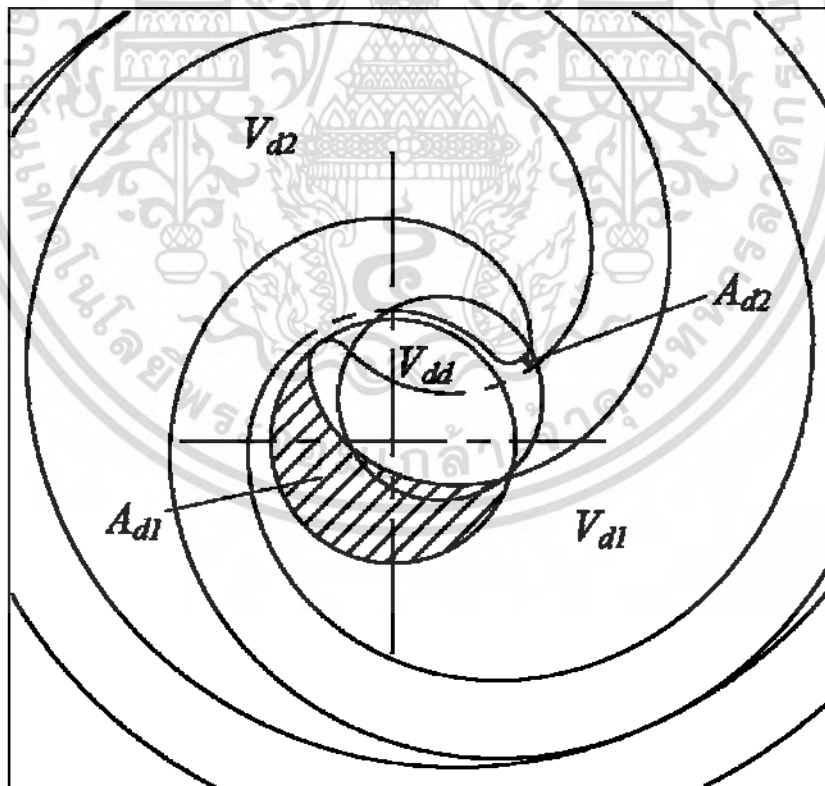


Fig. 2.5 Schematic of discharge chamber, reprinted from [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 V_d &= 2h \left(\frac{1}{2} \int_{\frac{5}{2}\pi - \theta^*}^{\varphi_e + 2\pi - \theta} L_i^2 d\varphi - \frac{1}{2} \int_{\frac{5}{2}\pi - \theta^*}^{\varphi_e + \pi - \theta} L_0^2 d\varphi \right) \\
 &= 2h \left(\frac{1}{2} \int_{\varphi_{os} + \pi + \alpha_0}^{\varphi_e + 2\pi - \theta} L_i^2 d\varphi - \frac{1}{2} \int_{\varphi_{os} + \alpha_0}^{\varphi_e + \pi - \theta} L_0^2 d\varphi \right)
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Here, $\varphi_{os} + \pi + \alpha_0 = \frac{5}{2}\pi - \theta^*$

$$V_d = har \left(\varphi_e - \theta + \theta^* - \frac{\pi}{2} \right) \left(\varphi_e - \theta - \theta^* - \alpha_i - \alpha_0 + \frac{7}{2}\pi \right) \tag{2.21}$$

$$\frac{dV_d}{d\theta} = har(-2\varphi_e + 2\theta + \alpha_i + \alpha_0 - 3\pi) \tag{2.22}$$

$$\varphi_e - \frac{5}{2}\pi + \theta^* < \theta \leq \varphi_e - \frac{\pi}{2} + \theta^*$$

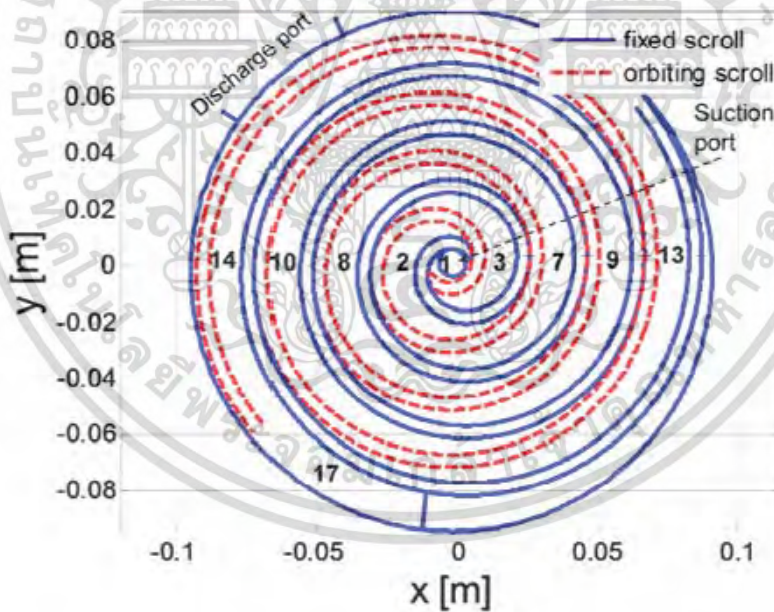


Fig. 2.6 Definition of expander working chamber, reprinted from [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The definition of expander working chamber of reference scroll has been shown in Fig. 2.6 used these set of equations (2.1) – (2.22) and its evolution of the volume of the different chambers with the crank angle has been introduced in Fig. 2.7.

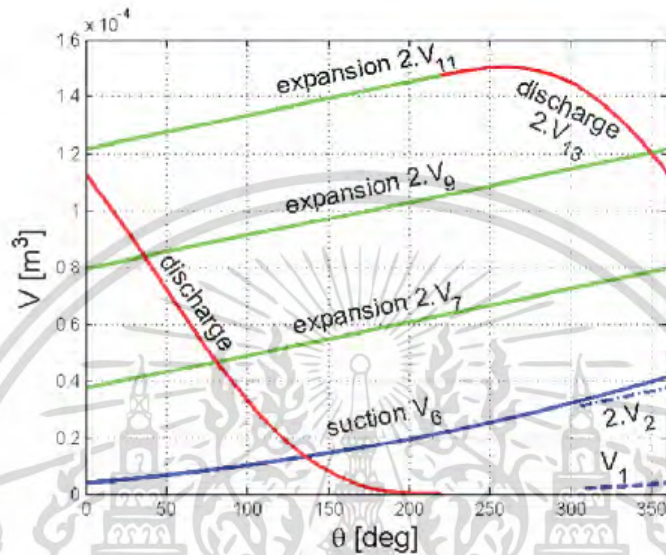


Fig. 2.7 Evolution of the volume of the different chambers with the crank angle, reprinted from [4]

2.5 Optimization Methodology

2.5.1 Mathematical Model

In this point of view, the nonlinear, constrained optimum design problem can be expressed mathematically as follows [5], [6]:

$$\text{Find } X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (2.23)$$

$$\text{to maximize } f(X) \quad (2.24)$$

$$\text{subject to } h_i(X) = 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.25a)$$

$$g_j(X) = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2.25b)$$

$$x_{k,min} \leq x_k \leq x_{k,max} \quad (2.25c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Based on the above discussion, the design variables are defined as the following: base circle radius r_b , inner ending involute angle φ_{ie} , scroll thickness t_s and scroll height h_s .

The scroll thickness and scroll height have been set up to 4.56 mm and 28.65 mm accordingly same as the standard scroll expander of Vincent Lemort [4].

Thus, the two design variables are shown in (2.26), [7]

$$X = [r_b, \varphi_{ie}]^T \quad (2.26)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chapter 3

Research methodology

3.1 Geometric Parameters of Scroll Expander

3.1.1 Scroll Wrap Definition

The scroll expander geometry is formed of involutes of a circle. Details of these geometric parameters are in the previous chapter, nevertheless the full derivations are presented by Baolong Wang [2]. The involute of a circle is the line that would be formed if unwrap a circle with radius r_b . The coordinates of a point on the involute are presented in Ian H. Bell [3] as the follow:

$$\begin{aligned}x &= r_b(\cos \varphi + (\varphi - \varphi_0) \sin \varphi) \\y &= r_b(\sin \varphi - (\varphi - \varphi_0) \cos \varphi)\end{aligned}\quad (3.1)$$

The thickness of the scroll wrap can be written by:

$$t_s = r_b(\varphi_{i0} - \varphi_{o0}) \quad (3.2)$$

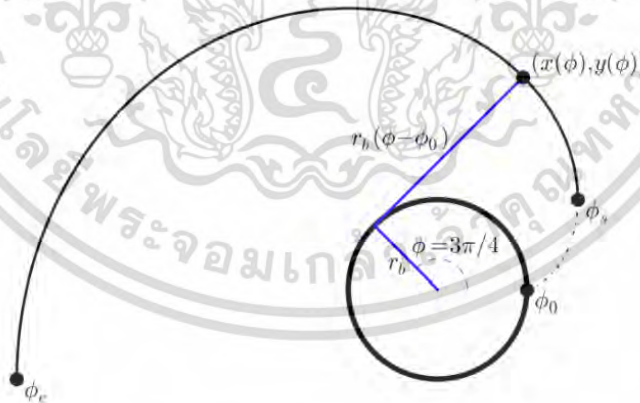


Fig. 3.1 Basic terminology of scroll involute, reprinted from [3]

The displacement volume, inner chamber volume and volume ratio can be given as the follow:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{disp} = -2\pi h_s r_b r_o (3\pi - 2\varphi_{ie} + \varphi_{i0} + \varphi_{o0}) \quad (3.3)$$

$$2V_{c,d} = 2\pi h_s r_b r_o (2\varphi_{os} + 3\pi - \varphi_{i0} - \varphi_{o0}) \quad (3.4)$$

$$V_{ratio} = \frac{V_{disp}}{2V_{c,d}} = \frac{3\pi - 2\varphi_{ie} + \varphi_{i0} + \varphi_{o0}}{-2\varphi_{os} - 3\pi + \varphi_{i0} + \varphi_{o0}} \quad (3.5)$$

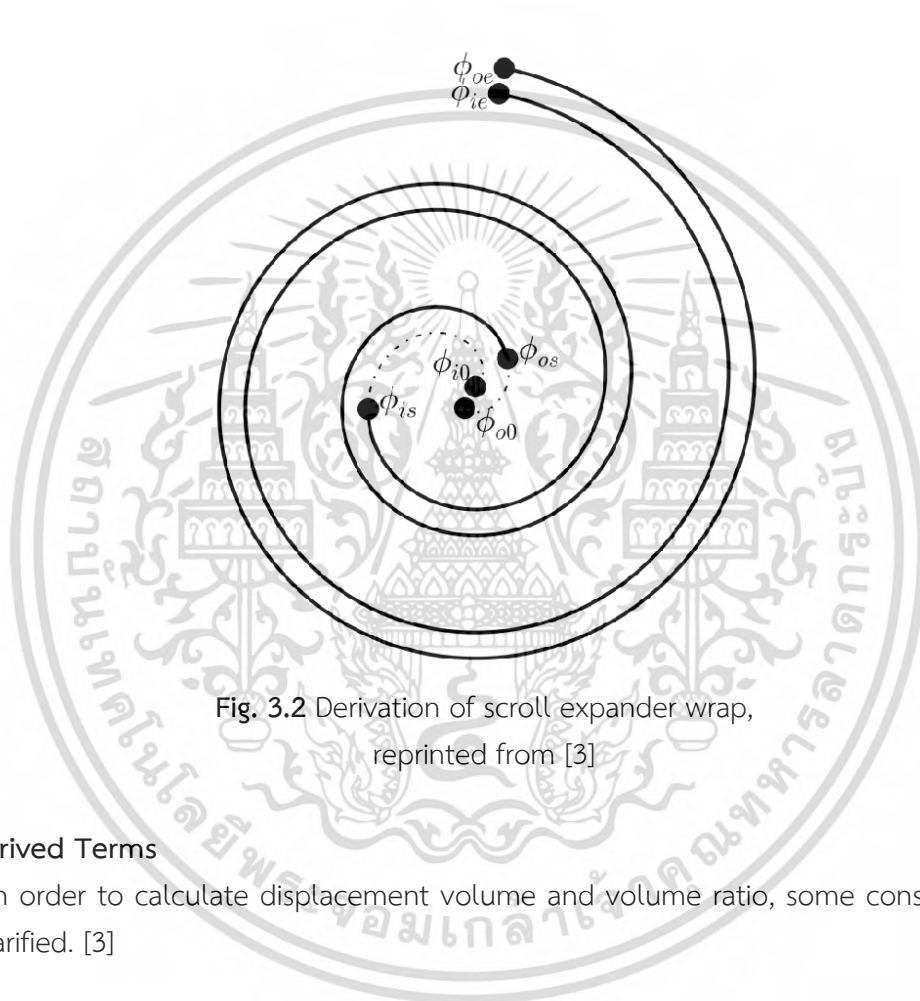


Fig. 3.2 Derivation of scroll expander wrap, reprinted from [3]

3.1.2 Derived Terms

In order to calculate displacement volume and volume ratio, some constraints need to be clarified. [3]

The orbiting radius of the orbiting scroll can be given by:

$$r_o = r_b \pi - t_s \quad (3.6)$$

The outer involute initial angle is given by:

$$\varphi_{o0} = -\frac{t_s}{r_b} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

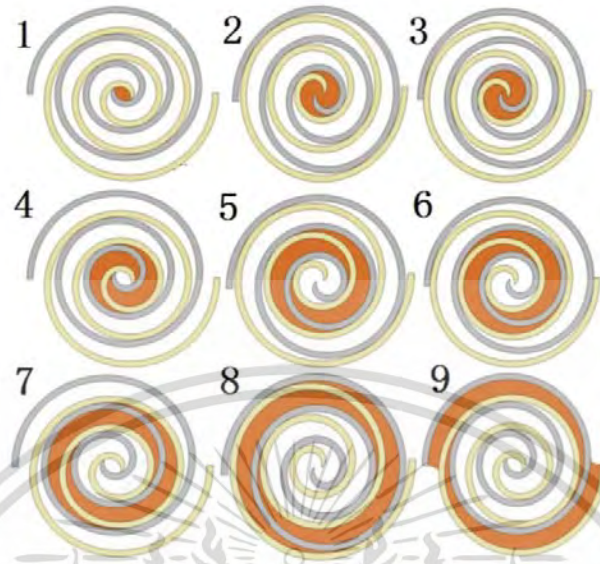


Fig. 3.3 Working process of a scroll expander, reprinted from [16]

The inner involute initial angle, φ_{i0} is set to 0.

The outer starting angle, φ_{os} is equal to $1.57 + \varphi_{o0}$ radians in Vincent Lemort [4] as the follow:

$$\varphi_{os} = 1.57 - \frac{t_s}{r_b} \quad (3.8)$$

After passed some simplification from (29) - (32), the height of the scroll wrap can be given by:

$$h_s = \frac{V_{disp}}{2\pi r b^2 V_{ratio} (\pi + \varphi_{o0}) (2\varphi_{os} + 3\pi - \varphi_{i0} - \varphi_{o0})} \quad (3.9)$$

3.2 Optimum Design for the Maximum Power

3.2.1 Objective function

The objective function can be expressed as shown in (14) using the design variables from (13).

$$V_{ratio} = f(r_b, \varphi_{ie}) \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In computation process, (3.5) - (3.8) will be used for evaluating to be the objective function.

3.2.2 Constraint conditions

In this optimal design of scroll expander wrap for organic Rankine cycle, the constraint conditions mainly consist of four aspects,

(h_1): Geometric relationship between h_s & V_{disp}

In computation process, (34) will be used for this constraint.

(g_1): Within allowable scroll radius, $R_{oe} \leq 90$

Scroll Radius, R_{oe} is the maximum radius of scroll orbit. This parameter is can be calculated as the follow:

$$R_{oe} = r_b + r_b \phi_{ie} + \frac{t_s}{2} \quad (3.12)$$

(g_2): Under limited $h_s \leq 12t_s$

To control the slenderness ratio of scroll height versus scroll thickness for the smooth operation of gas flow and prevent effect of transverse vibration.

(g_3): Acceptable $h_s \geq 2r_b$

To control the ratio of scroll height versus base circle radius for the smooth operation of gas flow.

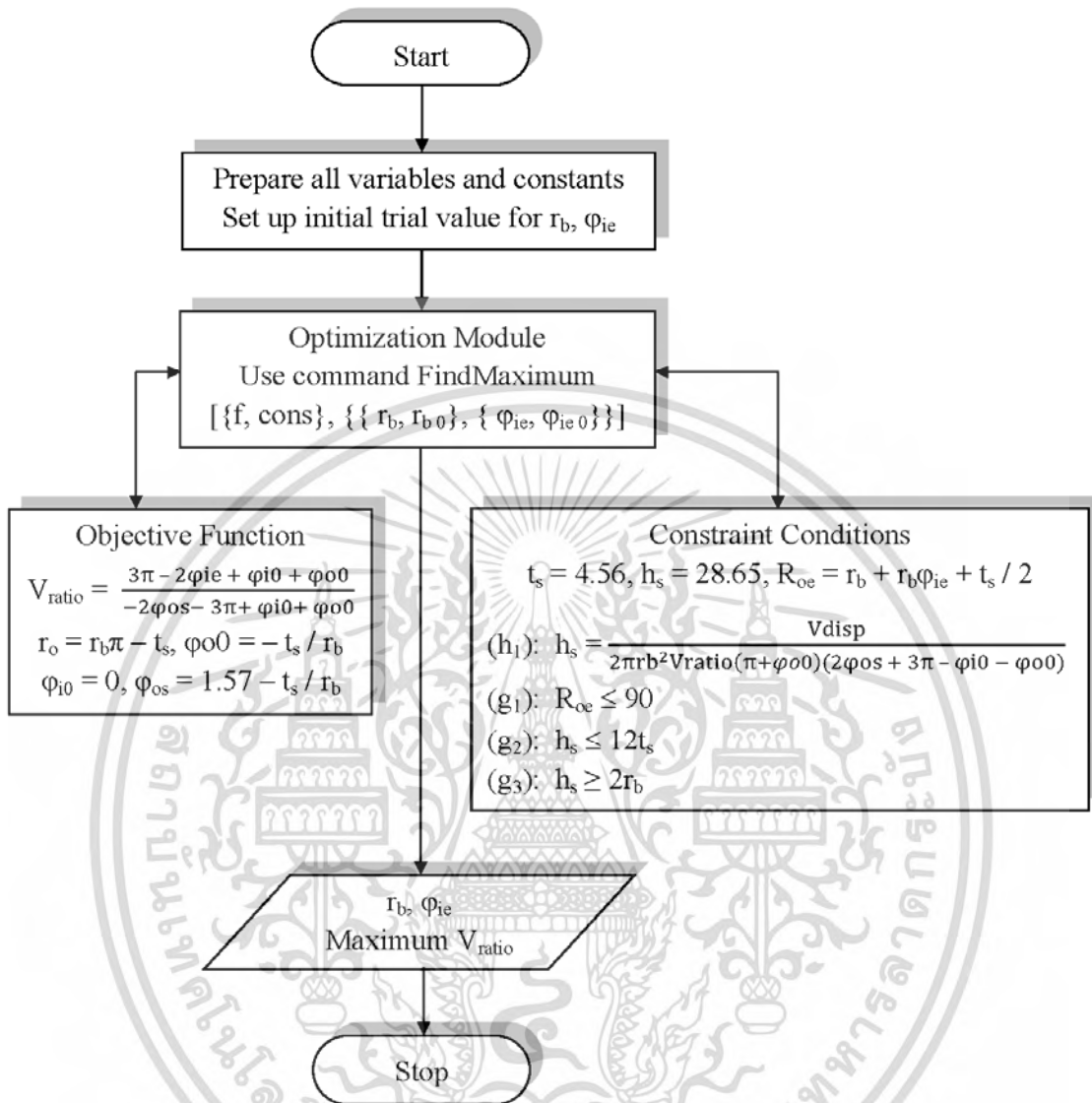


Fig. 3.4 Work flow of the calculation processes

Fig. 3.4 shows the implementation process of optimum design of scroll expander for the maximum power output with Wolfram Mathematica software.

3.2.3 Software Implementation Process

One equality and 3 non-equality constraints are involved in the optimal design of scroll expander wrap for organic Rankine cycle, and this problem is a typical constraint nonlinear programming problem. To solve this type of problems, can be broadly categorized into gradient-based methods and direct search methods. Gradient search methods use first derivatives (gradients) or second derivatives (Hessians) information. Examples are the

sequential quadratic programming (SQP) method, the augmented Lagrangian method, and the (nonlinear) interior point method.

Commercial numerical software such as Wolfram Mathematica can support existing optimization algorithms. When the objective function, constraint conditions and the initial values are defined, the optimum design can be preceded by optimization function, FindMaximum (Wolfram command).

FindMaximum used to solve numeric local optimization problem by linear programming methods, nonlinear interior point algorithms and utilize second derivatives. This command continues until either of the goals specified by AccuracyGoal or PrecisionGoal (Wolfram command) is achieved [8]. Fig. 3.5 and Fig. 3.6 show coding in Wolfram Mathematica.

```
(*Optimum Design of Scroll Expander for the Maximun Power Generation*)

(*Vratio = Objective function*)
(*2Vcd =  $(-2\pi*hs*rb*ro)*(-2\phi_{os}-3\pi+\phi_{i0}+\phi_{o0})$ *)
(*Vdisp = Vratio*(2Vcd)*)
(*rb = Variable1*)
(*ts = Constant*)
(*ro =  $rb*\pi-ts$  *)
(*hs = Constant*)
(*phi0 = 0*)
(*phi00 =  $-ts/rb$ *)
(*phi0s =  $1.57-ts/rb$ *)
(*phi0i =  $3.5-ts/rb$ *)
(*phi0e = Variable2*)
(*Roe =  $rb + rb*\phi_{ie} + ts/2$ *)

(*f = Objective Function = Maximize Vratio*)
(*c1 = Constraint 1 : h1 : Relationship between hs & Vdisp*)
(*c2 = Constraint 2 : g1 : Within Allowable Scroll Radius, Roe ≤ 90*)
(*c3 = Constraint 3 : g2 : Under Limited hs ≤ 12ts*)
(*c4 = Constraint 4 : g3 : Acceptable hs ≥ 2rb*)
```

Fig. 3.5 Coding of Optimum Design part 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ClearAll[Vdisp, rb,  $\phi$ ie, ts, hs, ro,  $\phi$ i0,  $\phi$ o0,  $\phi$ os, Roe,  $\phi$ is, Vcd, Vratio];

ts = 4.56; hs = 28.65; ro = rb *  $\pi$  - ts;  $\phi$ i0 = 0;  $\phi$ o0 = -ts / rb;
 $\phi$ os = 1.57 - ts / rb; Roe = rb + rb *  $\phi$ ie + ts / 2;  $\phi$ is = 3.5 - ts / rb;

Vratio = FindMaximum[{(3  $\pi$  - 2  $\phi$ ie +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0),
  hs == ((-2  $\pi$  * hs * rb * ro) * (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0)) /
  ((2  $\pi$  * rb^2) * ( $\pi$  +  $\phi$ o0) * (2  $\phi$ os + 3  $\pi$  -  $\phi$ i0 -  $\phi$ o0)) &&
  Roe  $\leq$  90 && hs  $\leq$  12 * ts && hs  $\geq$  2 rb && ro  $\geq$  0 && rb  $\geq$  0 &&  $\phi$ ie  $\geq$  0},
  {{rb, 2.50}, { $\phi$ ie, 18}}, PrecisionGoal  $\rightarrow$  6];
Print["Maximum Vratio = ", Vratio]

rb = 2.4755546332443448`;  $\phi$ ie = 34.43448355262709`;
Vcd = (-2  $\pi$  * hs * rb * ro) * (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / 2;
Vratio = (3  $\pi$  - 2  $\phi$ ie +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0);
Vdisp = Vratio * (2 Vcd);

Print["When rb = ", rb]
Print["When  $\phi$ ie = ",  $\phi$ ie]
Print["At ts = ", ts]
Print["At hs = ", hs]
Print["At ro = ", ro]
Print["At  $\phi$ i0 = ",  $\phi$ i0]
Print["At  $\phi$ o0 = ",  $\phi$ o0]
Print["At  $\phi$ os = ",  $\phi$ os]
Print["At  $\phi$ is = ",  $\phi$ is]
Print["At Roe = ", Roe]
Print["Get 2Vcd = ", 2 Vcd]
Print["Get Vratio = ", Vratio]
Print["Get Vdisp = ", Vdisp]

```

Fig. 3.6 Coding of Optimum Design part 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chapter 4

Result

4.1 Optimum Result

The optimization problem under consideration in this study is to find the optimal values of the design variable, x_i that maximize the built-in volume ratio, V_{ratio} . From the computation process, the result of optimum design compared with standard scroll expander has been shown as in Table. 4.1 – 4.3 By fixing scroll thickness, t_s 4.56 mm and scroll height, h_s 28.65 mm, in order to compare with standard scroll expander of Vincent Lemort [4]. That scroll wrap has built-in volume ratio, V_{ratio} 3.9061 at base circle radius, r_b 3.2640 mm, inner ending involute angle, ϕ_{ie} 25.8250 radians (4.1102 involute cycles). The maximum built-in volume ratio, V_{ratio} is 5.7155 (built-in volume ratio increase 44.3%) at base circle radius, r_b 2.4756 mm, inner ending involute angle, ϕ_{ie} 34.4345 radians (5.4804 involute cycles). This optimal point has shown in Fig. 4.1 and Fig. 4.2 for isometric perspective and contour of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle accordingly. The significant constraints are (h_1): Geometric relationship between h_s & V_{disp} , and (g_1): Within allowable scroll radius, $R_{oe} \leq 90$. Both of these criteria make the local maximum of volume ratio.

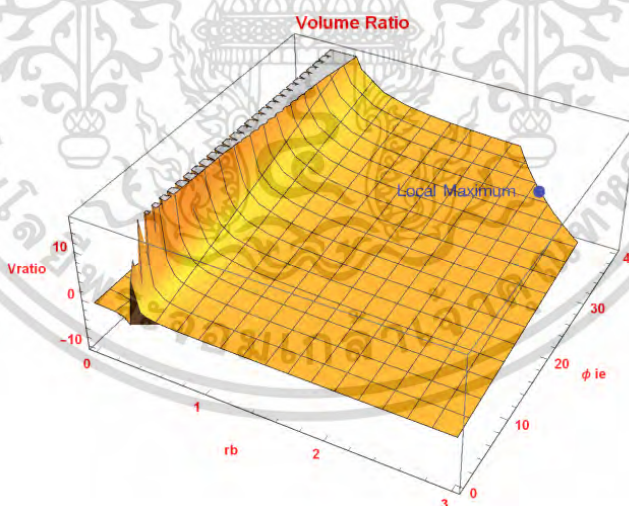


Fig. 4.1 Isometric perspective of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle

The result proof the assumption of built-in volume ratio varied to the number of involute cycle. But if no geometric relationship between h_s & V_{disp} , the scroll wrap will be impractical design from the incomplete geometrical characteristic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

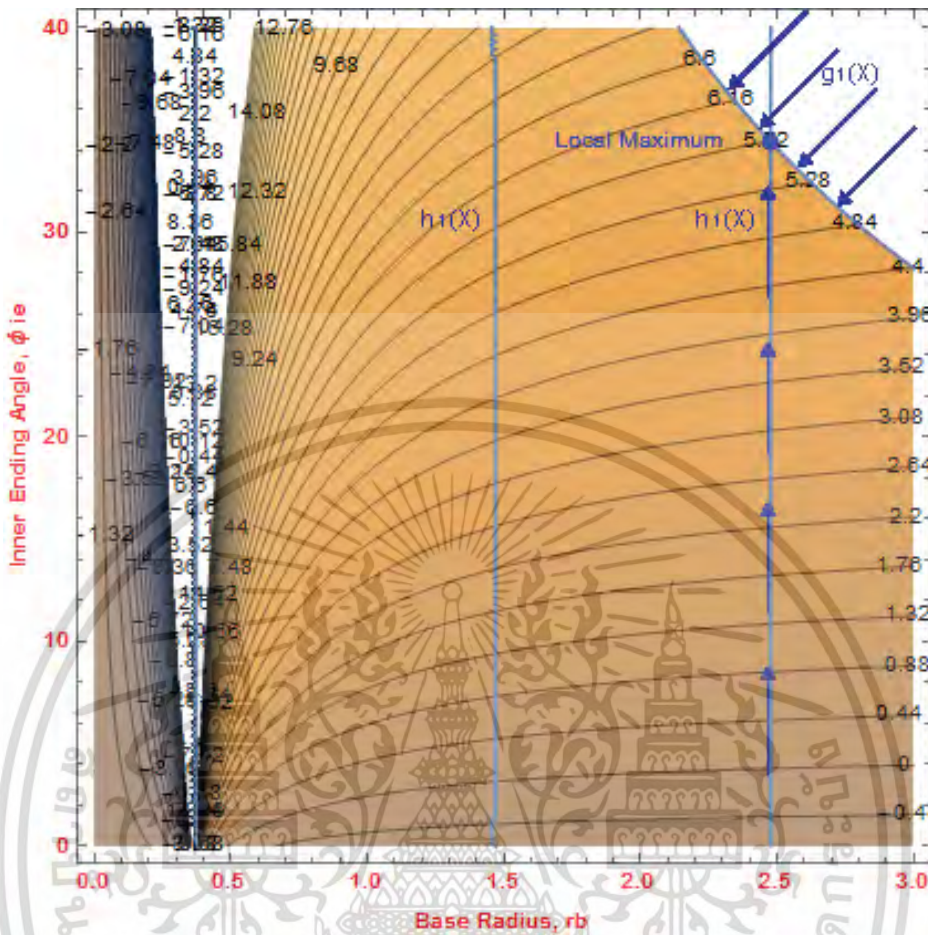


Fig. 4.2 Contour of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle

Table. 4.1 Size dimension of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model

Size Dimension	t_s [mm]	h_s [mm]	r_o [mm]	r_b [mm]	R_{oe} [mm]
Standard	4.56	28.65	5.6942	3.2640	89.8368
Optimum	4.56	28.65	3.2172	2.4756	89.9999

Table. 4.2 Angle dimension of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model

Angle Dimension	φ_{oo} [rad]	φ_{io} [rad]	φ_{os} [rad]	φ_{is} [rad]	φ_{ie} [rad]
Standard	-1.3971	0	0.1729	2.1029	25.8250
Optimum	-1.8420	0	-0.2720	1.6580	34.4345

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table. 4.3 Performance of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model

Performance	V_{disp} [mm ³]	$2V_{c,d}$ [mm ³]	V_{ratio}	% V_{ratio}	$Cycles$
Standard	145,946.0	37,363.6	3.9061	100.0	4.1102
Optimum	87,864.9	15,372.9	5.7155	144.3	5.4804

Table. 4.4 Comparing expansion ratios in the same shape (t_s , h_s and R_{oe}) between current ORC scroll expander research with optimum design model

Comparing	Constraints			Results		
	t_s [mm]	h_s [mm]	R_{oe} [mm]	r_b [mm]	V_{ratio}	% V_{ratio}
Zhu Wu [9]	5.08	51.55	64.3776	4.0860	1.774	100.0
Optimum Design	5.08	51.55	64.3776	2.1152	4.865	274.2
Jen-Chieh Chang [10]	4.00	41.00	56.8956	2.5900	2.950	100.0
Optimum Design	4.00	41.00	56.8956	2.1568	3.859	130.8

The current ORC scroll expander research compared with optimum design model has been shown as in Table. 4.4. The new one has higher built-in volume ratio for both papers. Zhu Wu's [9] scroll wrap has built-in volume ratio 1.774, Later, it can be increased to 4.865 and Jen-Chieh Chang's [10] scroll wrap can be changed from 2.950 to be 3.859 as well. (Another optimum constraint is not significant in both reference scrolls.)

The meaning of higher built-in volume ratio is that expander can reduce higher pressure. Xinjing Zhang [11] and Sebastien Declaye [12] described pressure ratio analysis in their research. The summary for ORC system is (i) normal expansion, of which the outlet pressure is almost close to the system required pressure; (ii) under expansion, of which the

discharging pressure is higher than the system required pressure, thus the flow of refrigerant is not smooth from the over pressure; (iii) over expansion, of which the discharging pressure is lower than the system required pressure thus it would cause reverse flow during discharging process. It can be called the pressure ratio corresponding to the built in volumetric ratio of the machine. The under/over expansion losses then occur as illustrated on the P-V diagram presented in Fig. 4.3.

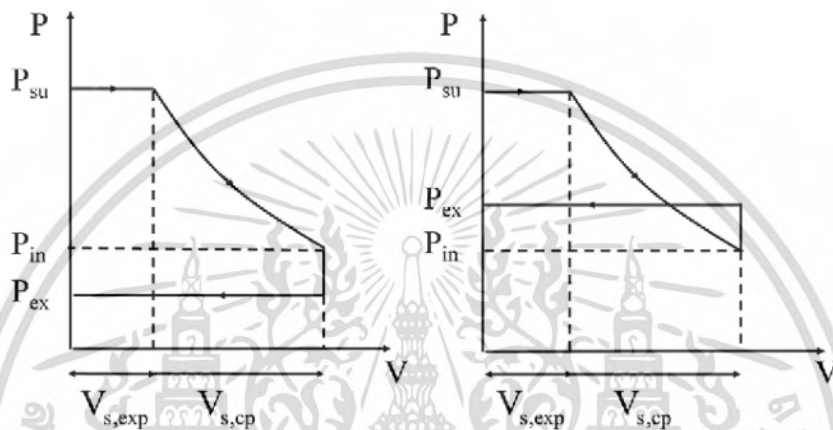


Fig. 4.3 Under/over expansion losses, reprinted from [12]

Thus, this can be the first process of ORC system design to maximize performance of expander machine within the desired dimension. Then set up the system suction/discharge pressure of expander from this built in volume ratio to be closed to isentropic expansion.

M. Kane [18] conducted the research in a small hybrid solar power system. It was found that the expander efficiency decreased at over and under expansion conditions.

Then use some equations from Zhu Wu [9] and Jen-Chieh Chang [10] to evaluate expander as the following.

The power output of the scroll expander is determined by the conservation equation of energy:

$$\dot{W} = \eta_{mec} + \dot{m}(h_{exp,in} - h_{exp,out}) \quad (4.1)$$

In which, $h_{exp,in}$ and $h_{exp,out}$ represent the enthalpy at the inlet and exit of the expander, respectively. The overall mechanical efficiency, η_{mec} is represents the affect from

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the transmission loss of the pulley and belt, and the mechanical loss of the power generator. Expander efficiency per unit flow rate is defined as:

$$\eta_{exp} = \frac{h_{exp,in} - h_{exp,out}}{h_{exp,in} - h_{exp,out,s}} \quad (4.2)$$

where, $h_{exp,out,s}$ means the state of fluid, calculated by isentropic expansion process. The volumetric efficiency could be determined the leakage level of a scroll expander. This is defined as the ratio of theoretical mass flow rate and the actual one:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{th}}{\dot{m}_{actual}} \quad (4.3)$$

The built-in volume ratio varies with pressure ratio. Fadhel Ayachi's experiment shows the net electrical power output increases with the increase of the pressure ratio as well as the increase of the supply pressure and the net efficiency close to 70% after pressure ratio over 3.0 [19]. This leads to the brake horse power increases with the increase of the pressure ratio after pressure ratio over 3.0.

```

Maximum Vratio = {5.71552, {rb → 2.47555, φie → 34.4345}}
When rb = 2.47555
When φie = 34.4345
At ts = 4.56
At hs = 28.65
At ro = 3.21718
At φi0 = 0
At φo0 = -1.84201
At φos = -0.272011
At φis = 1.65799
At Roe = 90.
Get 2Vcd = 15373.
Get Vratio = 5.71552
Get Vdisp = 87864.9

```

Fig. 4.4 Data Validation Result

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 Sensitivity Analysis

The author tries to run optimization program in 3 variables, t_s , r_b and φ_{ie} but the result can't be complete (use $h_s = 28.65$ mm). Then changes t_s from 4.56 mm to 3, 3.5 and 4 mm and run optimization program with the current 2 variables, r_b and φ_{ie} . After that uses this method with 5, 5.5 and 6 mm. There are some interesting with the result as in Fig. 4.5 and Fig. 4.6.

When $r_b = 3.26211$	When $r_b = 1.15129$	When $r_b = 3.45038$
When $\varphi_{ie} = 26.1297$	When $\varphi_{ie} = 75.6529$	When $\varphi_{ie} = 24.5044$
At $t_s = 3.$	At $t_s = 3.5$	At $t_s = 4.$
At $h_s = 28.65$	At $h_s = 28.65$	At $h_s = 28.65$
At $r_o = 7.24821$	At $r_o = 0.116894$	At $r_o = 6.83969$
At $\varphi_{i0} = 0$	At $\varphi_{i0} = 0$	At $\varphi_{i0} = 0$
At $\varphi_{o0} = -0.919651$	At $\varphi_{o0} = -3.04006$	At $\varphi_{o0} = -1.15929$
At $\varphi_{os} = 0.650349$	At $\varphi_{os} = -1.47006$	At $\varphi_{os} = 0.410708$
At $\varphi_{is} = 2.58035$	At $\varphi_{is} = 0.45994$	At $\varphi_{is} = 2.34071$
At $Roe = 90.$	At $Roe = 90.$	At $Roe = 90.$
Get $2V_{cd} = 49565.2$	Get $2V_{cd} = 230.745$	Get $2V_{cd} = 48453.1$
Get $V_{ratio} = 3.75731$	Get $V_{ratio} = 15.2153$	Get $V_{ratio} = 3.57226$
Get $V_{disp} = 186232.$	Get $V_{disp} = 3510.85$	Get $V_{disp} = 173087.$

Fig. 4.5 Sensitivity Analysis Result of $t_s = 3, 3.5$ and 4 mm

After consider all pairs of t_s and V_{ratio} , the result can be summarized that the change of volume ratio, V_{ratio} have not the relation with the change of scroll thickness, t_s in both lower and higher than the optimum t_s 4.56 mm.

Remark: h_s is not a variable of V_{ratio} .

When $r_b = 2.5$	When $r_b = 4.09539$	When $r_b = 2.08334$
When $\phi_{ie} = 34.$	When $\phi_{ie} = 20.3044$	When $\phi_{ie} = 40.7599$
At $t_s = 5.$	At $t_s = 5.5$	At $t_s = 6.$
At $h_s = 28.65$	At $h_s = 28.65$	At $h_s = 28.65$
At $r_o = 2.85398$	At $r_o = 7.36604$	At $r_o = 0.544997$
At $\phi_{i0} = 0$	At $\phi_{i0} = 0$	At $\phi_{i0} = 0$
At $\phi_{o0} = -2.$	At $\phi_{o0} = -1.34297$	At $\phi_{o0} = -2.87999$
At $\phi_{os} = -0.43$	At $\phi_{os} = 0.227026$	At $\phi_{os} = -1.30999$
At $\phi_{is} = 1.5$	At $\phi_{is} = 2.15703$	At $\phi_{is} = 0.620006$
At $Roe = 90.$	At $Roe = 90.$	At $Roe = 90.$
Get $2V_{cd} = 13569.3$	Get $2V_{cd} = 60939.2$	Get $2V_{cd} = 1979.47$
Get $V_{ratio} = 5.7337$	Get $V_{ratio} = 2.89856$	Get $V_{ratio} = 7.74153$
Get $V_{disp} = 77802.$	Get $V_{disp} = 176636.$	Get $V_{disp} = 15324.1$

Fig. 4.6 Sensitivity Analysis Result of $t_s = 5, 5.5$ and 6 mm

4.4 Derivation of Pair of Scroll Wrap Program

The author uses the equations in chapter 3 ((3.1) – (3.12)) to develop to be pair of scroll wrap in appendix B, The Pair of Scroll Wrap Program. This program can write the pair of scroll wrap from any t_s, r_b and ϕ_{ie} in 2 dimensions as a sample in Fig. 4.7. Then uses the optimum result of these 3 variables plot our optimum scroll expander pair as in Fig. 4.8.

```

β = 0;
δx = ro * Cos[φie + β]; (* Orbit Radius,
ro is the radius which control the orbit of moving scroll. *)
δy = ro * Sin[φie + β];
(* 2ro = 2πrb + 2ts and Cos[γ] = Cos[φie - 2nπ] = Cos[φie] *)
m = δy / δx;

co = ParametricPlot[ { a * ( Cos[φi + φo0] + φi * Sin[φi + φo0] ) + δx,
  a * ( Sin[φi + φo0] - φi * Cos[φi + φo0] ) + δy }, { φi, φos, φie + tor },
  PlotRange → { -120, 120 }, PlotStyle → { RGBColor[ 0, 1, 0 ] }; (*...OK*)
ci = ParametricPlot[ { a * ( Cos[φi + φi0] + φi * Sin[φi + φi0] ) + δx,
  a * ( Sin[φi + φi0] - φi * Cos[φi + φi0] ) + δy }, { φi, φis, φie },
  PlotRange → { -120, 120 }, PlotStyle → { RGBColor[ 0, 1, 0 ] };
(*Remark: Use φi as a dummy for all curve from φi0=0 ...OK*)
ct = ParametricPlot[ { (Ravg * Cos[φi] + xcircle0) + δx, (Ravg * Sin[φi] + ycircle0) + δy },
  { φi, φos - tor * 1.25, φis + φi0 - tor / 1.2 },
  PlotRange → { -120, 120 }, PlotStyle → { RGBColor[ 0, 1, 0 ] };
(*Remark: 1.28 is the calibration factor. ...OK*)
ce = ParametricPlot[
  { x, (( a * ( Sin[ ( φie + tor ) + φo0 ] - ( φie + tor ) * Cos[ ( φie + tor ) + φo0 ] ) + δy ) -
    ( a * ( Sin[ φie + φi0 ] - φie * Cos[ φie + φi0 ] ) + δy ) ) /
    (( a * ( Cos[ ( φie + tor ) + φo0 ] + ( φie + tor ) * Sin[ ( φie + tor ) + φo0 ] ) + δx ) -
    ( a * ( Cos[ φie + φi0 ] + φie * Sin[ φie + φi0 ] ) + δx ) ) *
    ( x - ( a * ( Cos[ φie + φi0 ] + φie * Sin[ φie + φi0 ] ) + δx ) ) +
    ( a * ( Sin[ φie + φi0 ] - φie * Cos[ φie + φi0 ] ) + δy ) },
  { x, a * ( Cos[ φie + φi0 ] + φie * Sin[ φie + φi0 ] ) + δx,
  a * ( Cos[ ( φie + tor ) + φo0 ] + ( φie + tor ) * Sin[ ( φie + tor ) + φo0 ] ) + δx },
  PlotRange → { -120, 120 }, PlotStyle → { RGBColor[ 0, 1, 0 ] }; (*...OK*)

```

Fig. 4.7 Sample of code for Orbiting Scroll Wrap

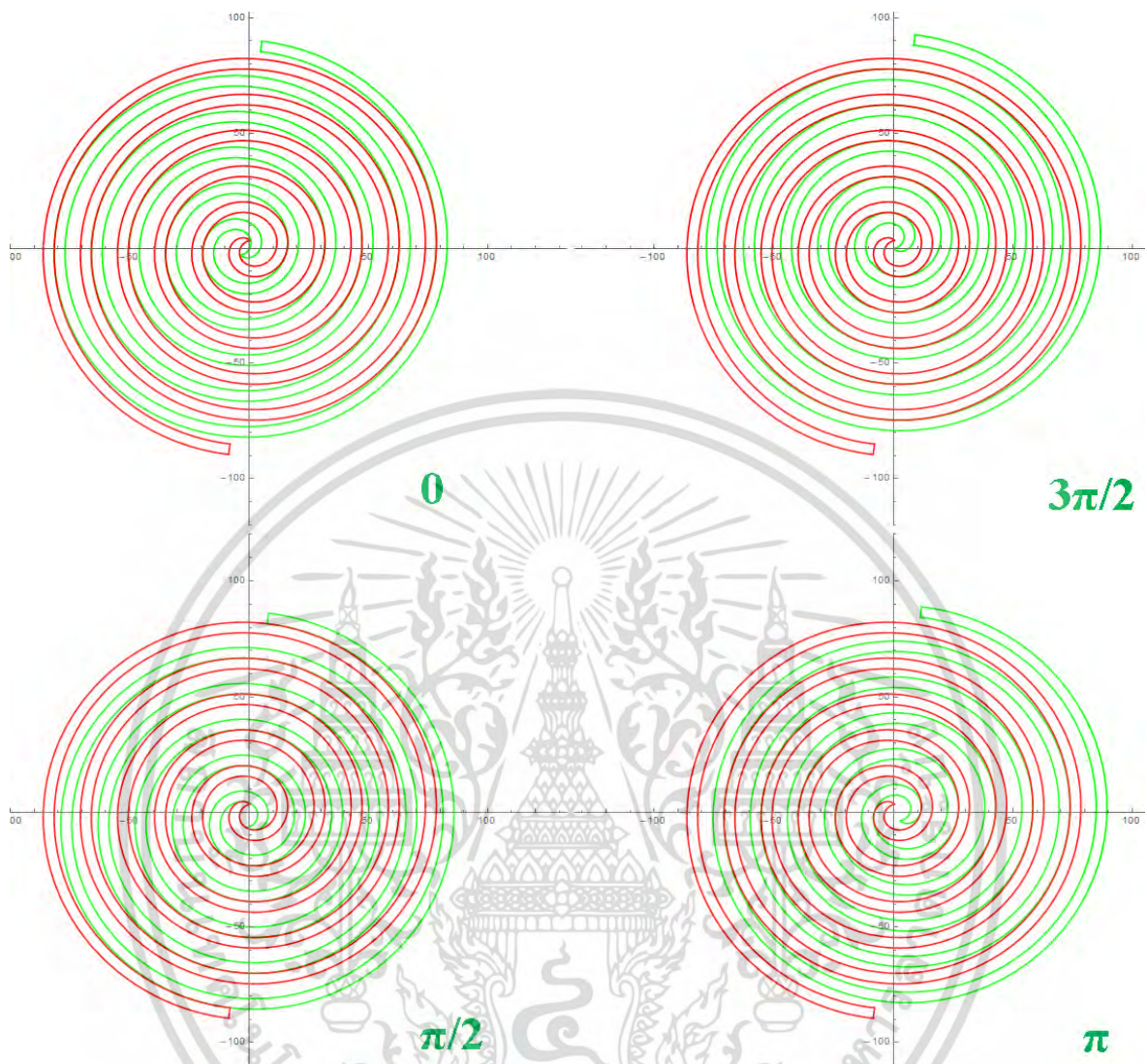


Fig. 4.8 Counter Clock Wise Turning of Moving Scroll (Green)

4.5 Create Scroll Expander Shape in CAD

4.5.1 Create 3 dimensions of Scroll Expander Wrap

From the above scroll wrap pair, uses the fixed scroll for derivation of the curve points as in appendix C. The Data Table of a Scroll Wrap Program as a sample in Fig. 4.9. From the pairs of coordinate x-y in data table, plots these 4 curves of a scroll wrap (outer, inner, transition and ending curve) in Excel before convert to SolidWorks in 2 dimensions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

More than 14,000 points were used in this plot (no = 7067, ni = 6443, nt = 391, ne = 145). Then, add thickness h_s 28.65 mm to be 3 dimensions as in Fig. 4.10.

ϕt	dtx	dty
-1.3593	0.34387	3.40364
-1.3543	0.31701	3.39780
-1.3493	0.29018	3.39183
-1.3443	0.26338	3.38573
-1.3393	0.23661	3.37949
-1.3343	0.20988	3.37312
-1.3293	0.18317	3.36661
-1.3243	0.15650	3.35997
-1.3193	0.12986	3.35320
-1.3143	0.10326	3.34629
-1.3093	0.07669	3.33925
-1.3043	0.05016	3.33208
-1.2993	0.02366	3.32478
-1.2943	-0.00280	3.31734
-1.2893	-0.02923	3.30977
-1.2843	-0.05561	3.30207
-1.2793	-0.08196	3.29424
-1.2743	-0.10826	3.28627
-1.2693	-0.13453	3.27818
-1.2643	-0.16076	3.26995
-1.2593	-0.18694	3.26159
-1.2543	-0.21308	3.25310

Fig. 4.9 Sample of Transition Curve Points

After the 3 dimensions scroll wrap in SolidWorks have been created, the key 4 parts of scroll mechanism, fixed scroll, orbiting scroll, Oldham joint and thrust bearing can be developed in the next process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

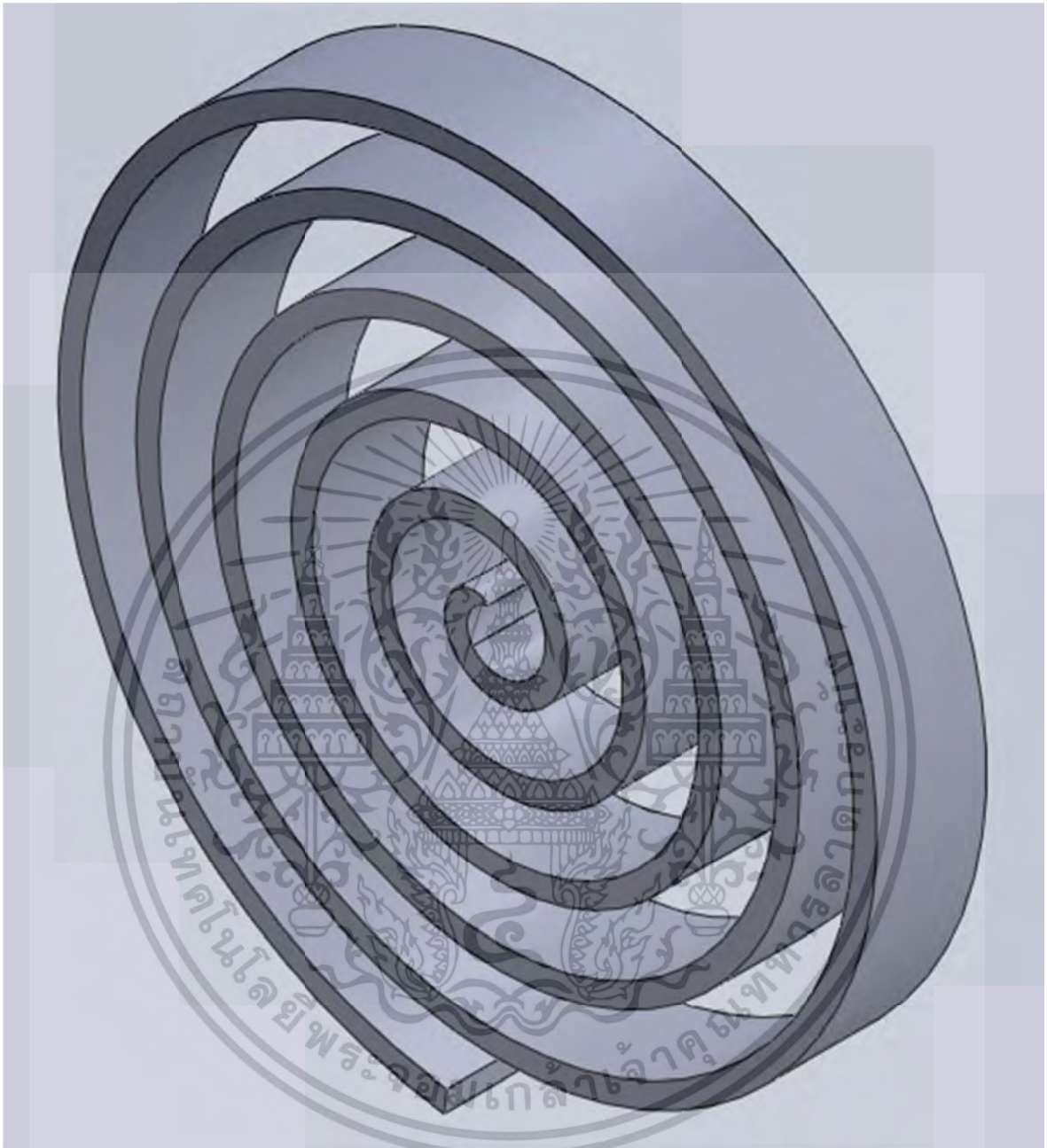


Fig. 4.10 Scroll Expander Wrap in 3 dimensions

4.5.2 Create the 4 key parts of Scroll Mechanism and Assembly Simulation

The scroll mechanism needed to be considered again before write any part as in Fig. 4.11.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

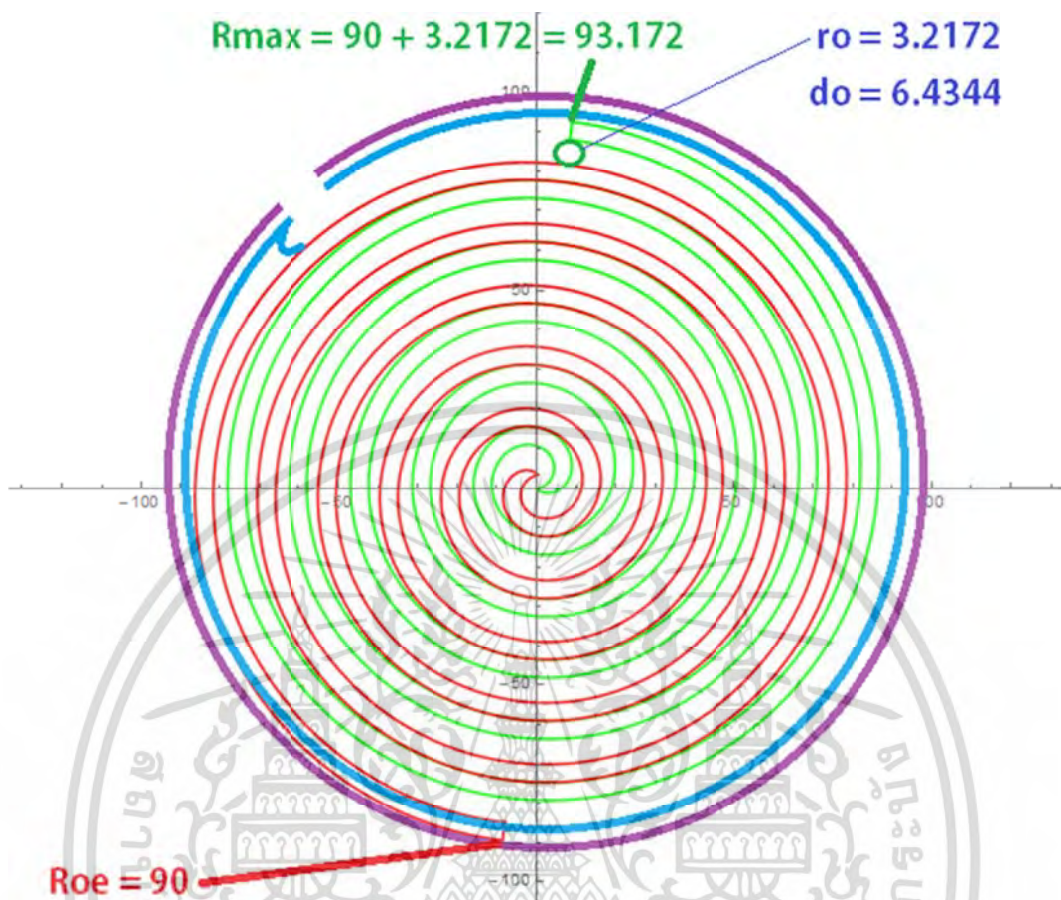


Fig. 4.11 The scroll mechanism

This figure shows the motion path of moving scroll. The inside skin of fixed scroll must greater than $R_{oe} + r_o = 93.172$ mm. The author designs the available space for the first model of this machine as in Fig. 4.12 and Fig. 4.13.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig. 4.12 2 dimensions cross section of scroll pair

Fig. 4.13 3 dimensions cross section of scroll pair

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 4 key parts of scroll mechanism (fixed scroll, orbiting scroll, Oldham joint and thrust bearing) and supporting parts (journal bearing, generator shaft, main bearing and housing) have been developed as in Fig. 4.14 to Fig. 4.24.



Fig. 4.14 Fixed Scroll Expander model (Front)



Fig. 4.15 Fixed Scroll Expander model (Back)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

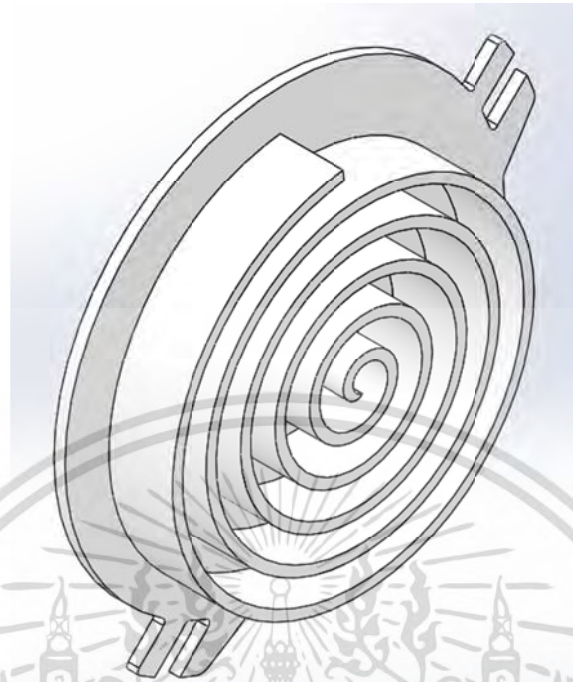


Fig. 4.16 Orbiting Scroll Expander model (Front)



Fig. 4.17 Orbiting Scroll Expander model (Back)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

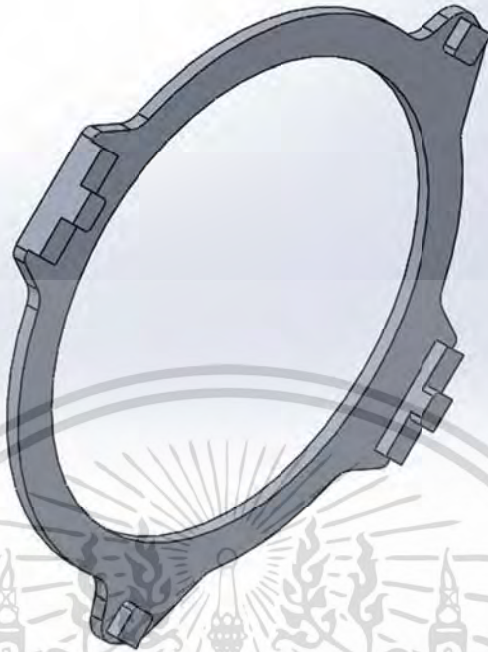


Fig. 4.18 Oldham Joint model



Fig. 4.19 Thrust Bearing model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

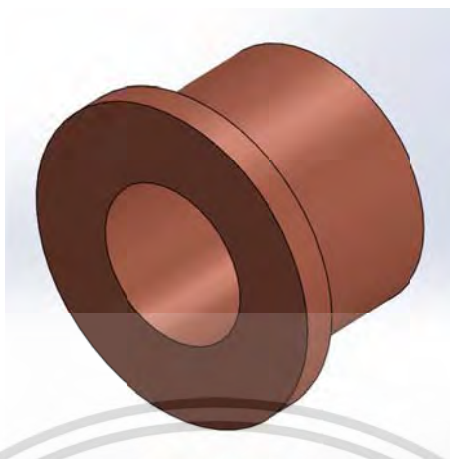


Fig. 4.20 Journal Bearing



Fig. 4.21 Generator Shaft



Fig. 4.22 Main Bearing and Housing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig. 4.23 Assembly of Scroll Expander model (bottom up)

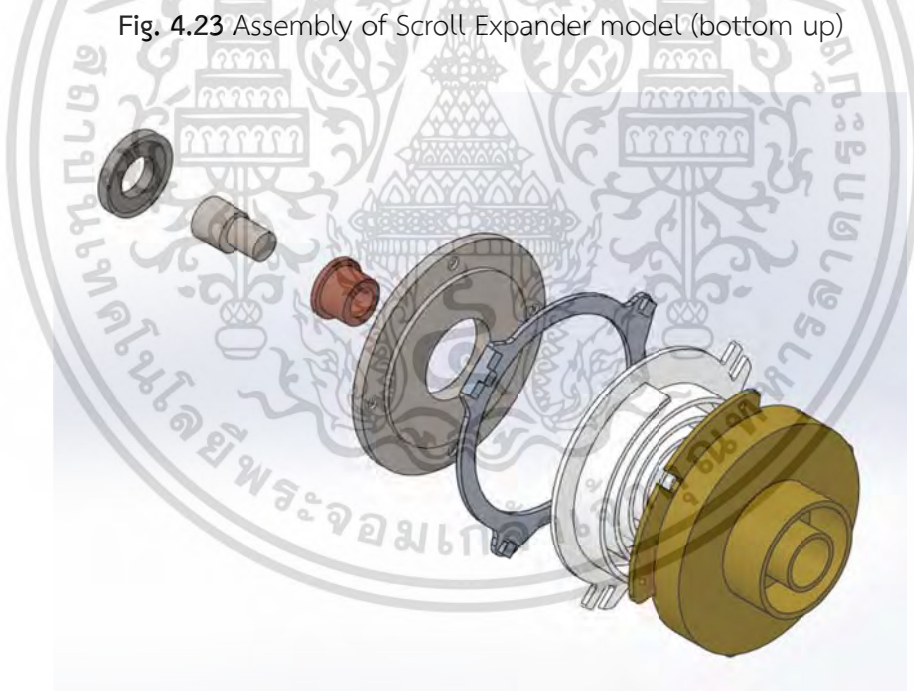


Fig. 4.24 Assembly of Scroll Expander model (top down)

The another important topic to be concerned for shape design is the matching of Oldham joint with orbiting scroll and fixed scroll. Tolerance and fits are concerned in this work. Preferred hole basis of ISO fits has been chosen.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The ISO System of Limits and Fits is a coordinated system of hole and shaft tolerances for engineering and manufacturing used for cutting tools, material stock, gages, etc. If held to these tolerances, cutting tools, material stock, and gages are available throughout the world [17].

The hole basis fits have four preferred hole tolerances (H11, H9, H8, and H7); the shaft basis fits have four preferred shaft tolerances (h11, h9, h7, and h6) as shown in Fig. 4.25.

		ISO SYMBOL		DESCRIPTION	
		Hole Basis	Shaft Basis		
Clearance Fits		H11/c11	C11/h11	<u>Loose running fit</u> for wide commercial tolerances or allowances on external members.	More Clearance
		H9/d9	D9/h9	<u>Free running fit</u> not for use where accuracy is essential, but good for large temperature variations, high running speeds, or heavy journal pressures.	
		H8/f7	F8/h7	<u>Close running fit</u> for running on accurate machines and for accurate location at moderate speeds and journal pressures.	
Transition Fits		H7/g6	G7/h6	<u>Sliding fit</u> not intended to run freely, but to move and turn freely and locate accurately.	More Interference
		H7/h6	H7/h6	<u>Locational clearance fit</u> provides snug fit for locating stationary parts; but can be freely assembled and disassembled.	
	H7/k6	K7/h6	<u>Locational transition fit</u> for accurate location, a compromise between clearance and interference.		
	H7/n6	N7/h6	<u>Locational transition fit</u> for more accurate location where greater interference is permissible.		
	H7/p6¹	P7/h6	<u>Locational interference fit</u> for parts requiring rigidity and alignment with prime accuracy of location but without special bore pressure requirements.		
Interference Fits		H7/s6	S7/h6	<u>Medium drive fit</u> for ordinary steel parts or shrink fits on light sections, the tightest fit usable with cast iron.	
		H7/u6	U7/h6	<u>Force fit</u> suitable for parts which can be highly stressed or for shrink fits where the heavy pressing forces required are impractical.	

¹Transition fit for basic sizes in range from 0 through 3 mm.

Fig. 4.25 Description of preferred fits (ANSI B4.2)

There are 3 fits of hole basis were used in optimum scroll as the follow:

- 1) H7/g6 for sliding fit between orbiting scroll and Oldham joint and between Oldham joint and fixed scroll.
- 2) H8/f7 for close running between orbiting scroll journal bearing.
- 3) H7/s6 for medium drive between journal bearing and generator shaft and between generator shaft and main bearing.

Fig. 4.26 shows the bottom view of scroll assembly which connected to generator shaft

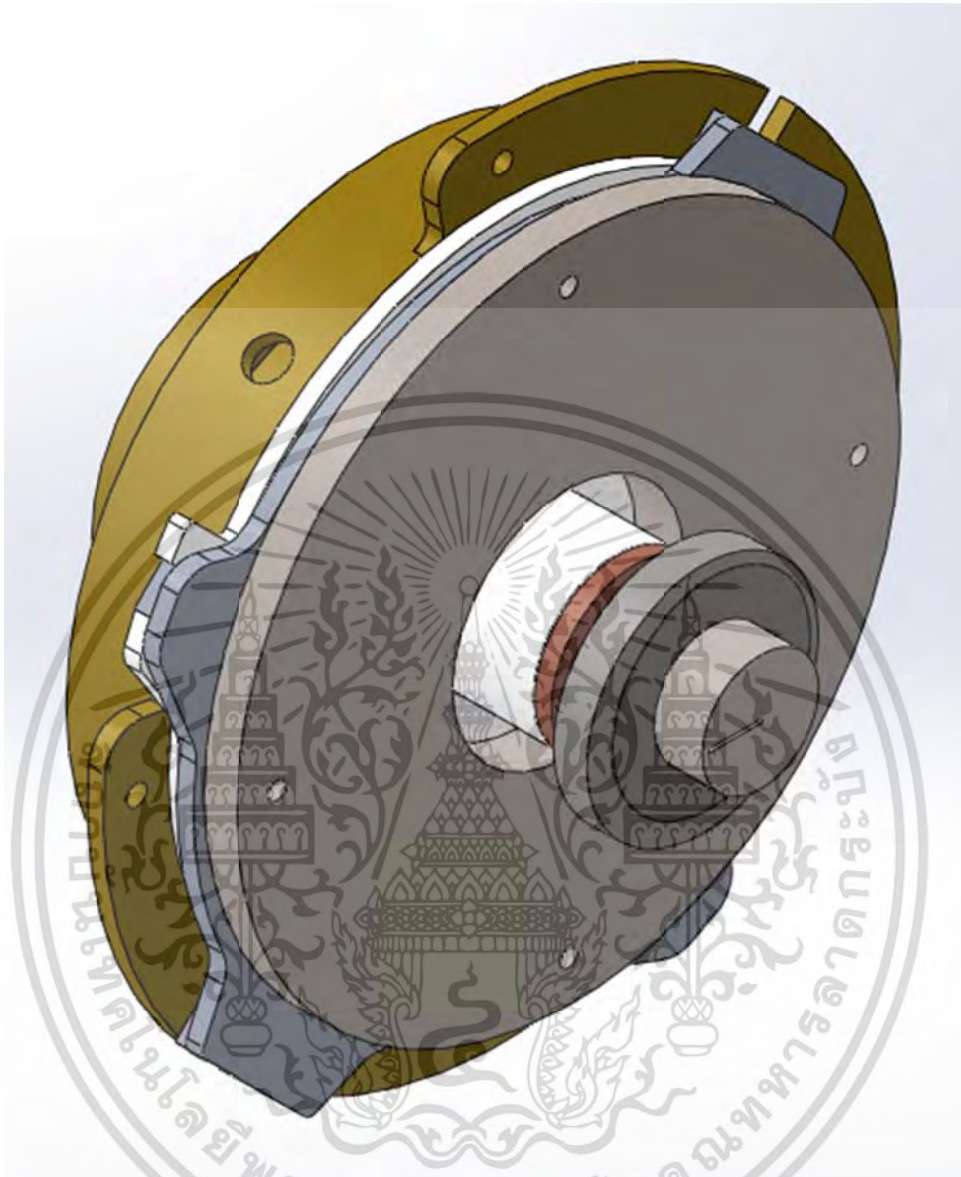


Fig. 4.26 Bottom view of Scroll Expander assembly

Fig. 4.27 describes the scroll pair contact from the clock wise rotation of orbiting scroll. The red line represents the orbit angle which turning around generator shaft. The blue ring represents the orbiting circle which has orbit radius, r_o for the motion of orbiting scroll. The orbiting scroll just moving clock wise but its wrap has no rotation from the locking of Oldham joint.

Fig. 4.28 to Fig. 4.30 shows all synchronizing in top section view of this machine from 0 to 345 degree with the smooth motion.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

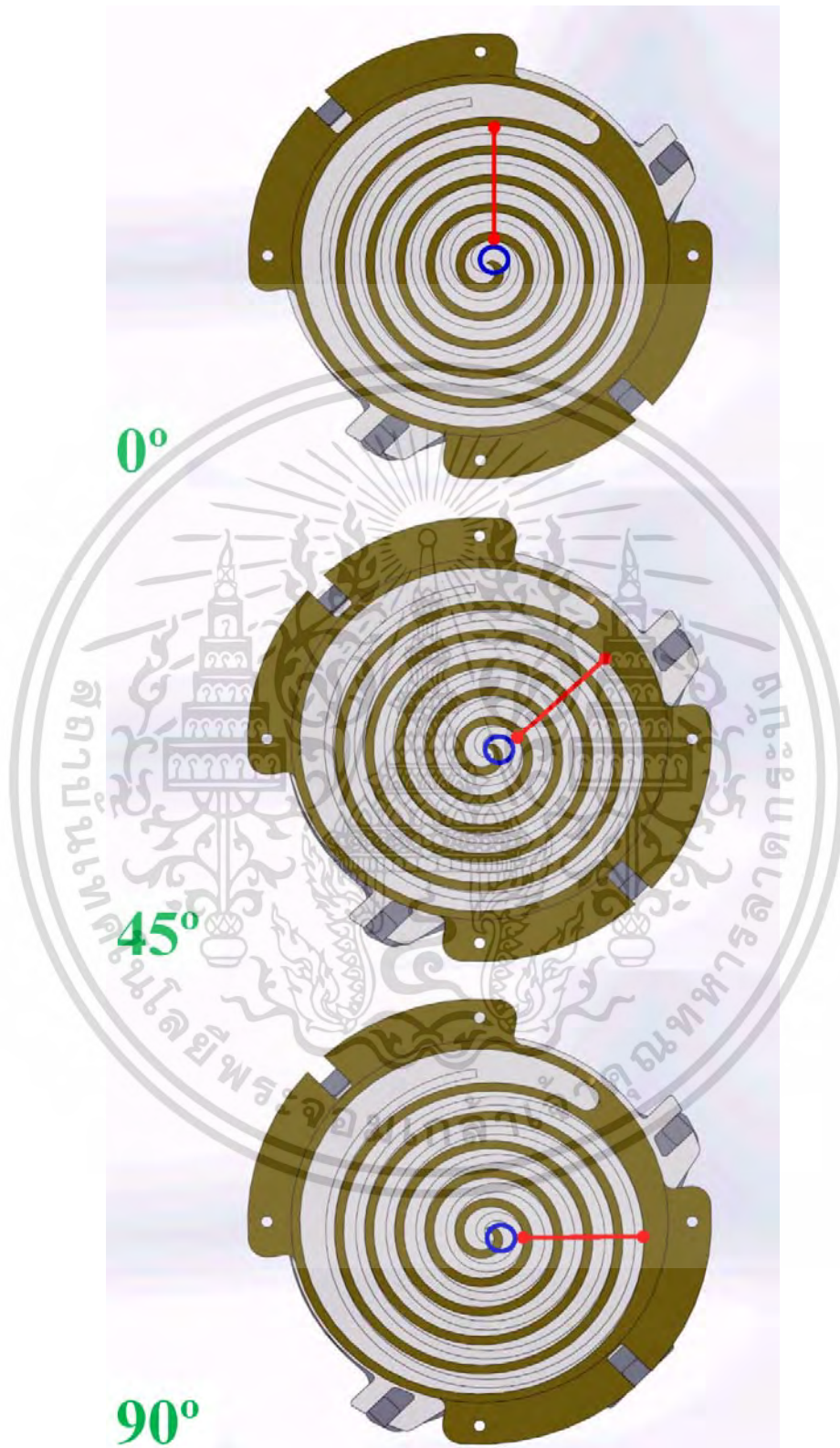


Fig. 4.27 Describe the Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

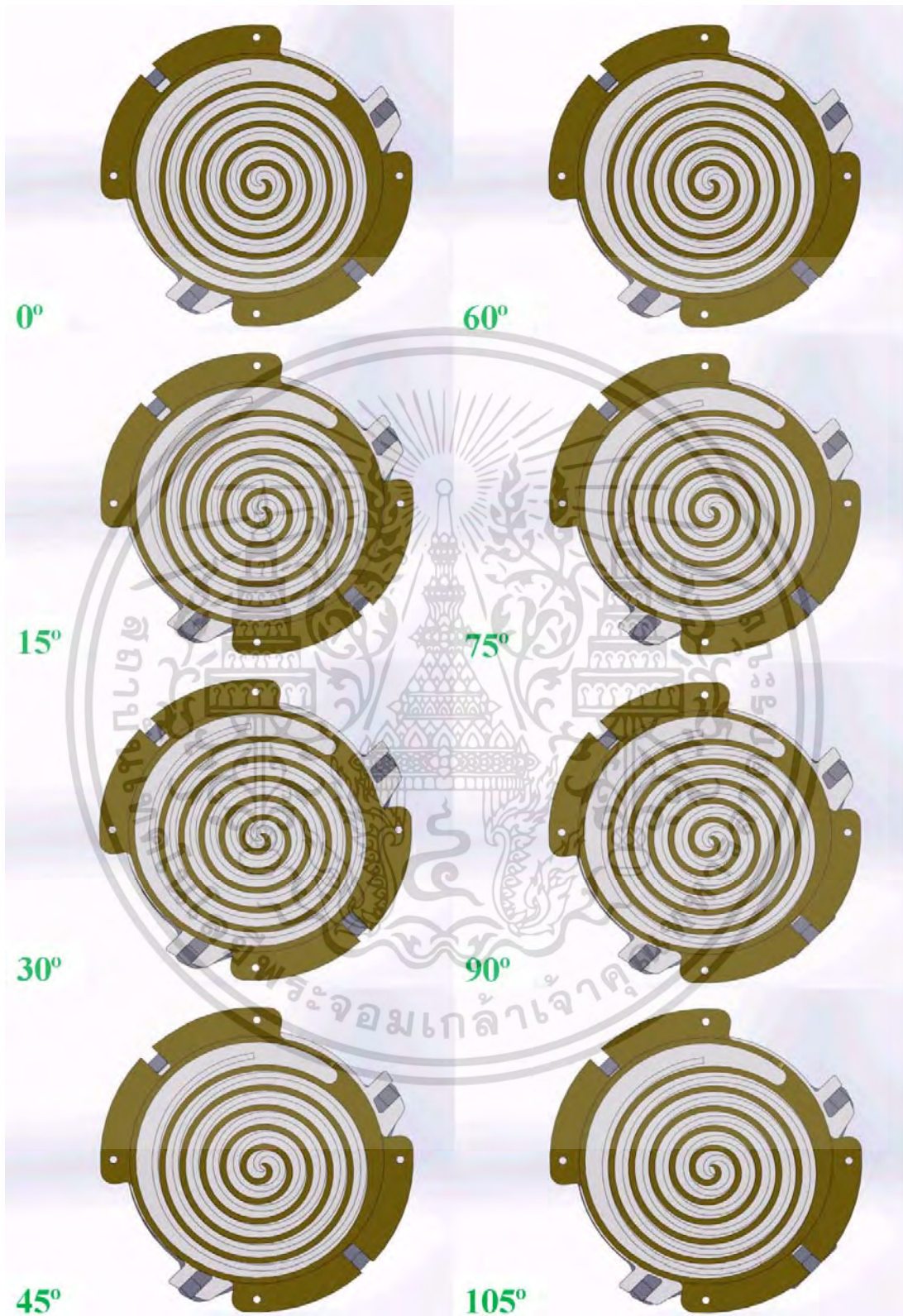


Fig. 4.28 Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander in 0 – 105 degree

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

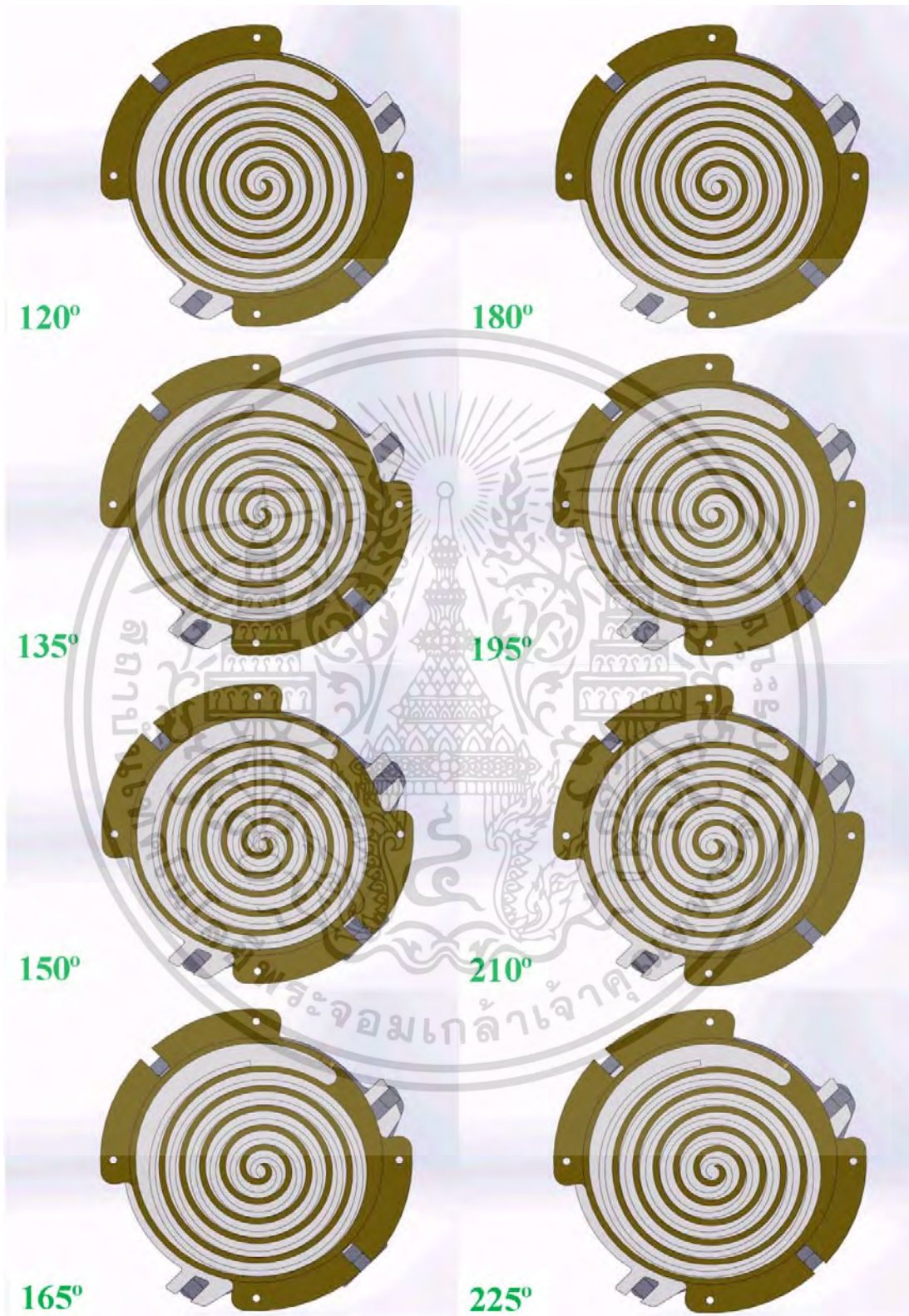


Fig. 4.29 Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander in 120 – 225 degree

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

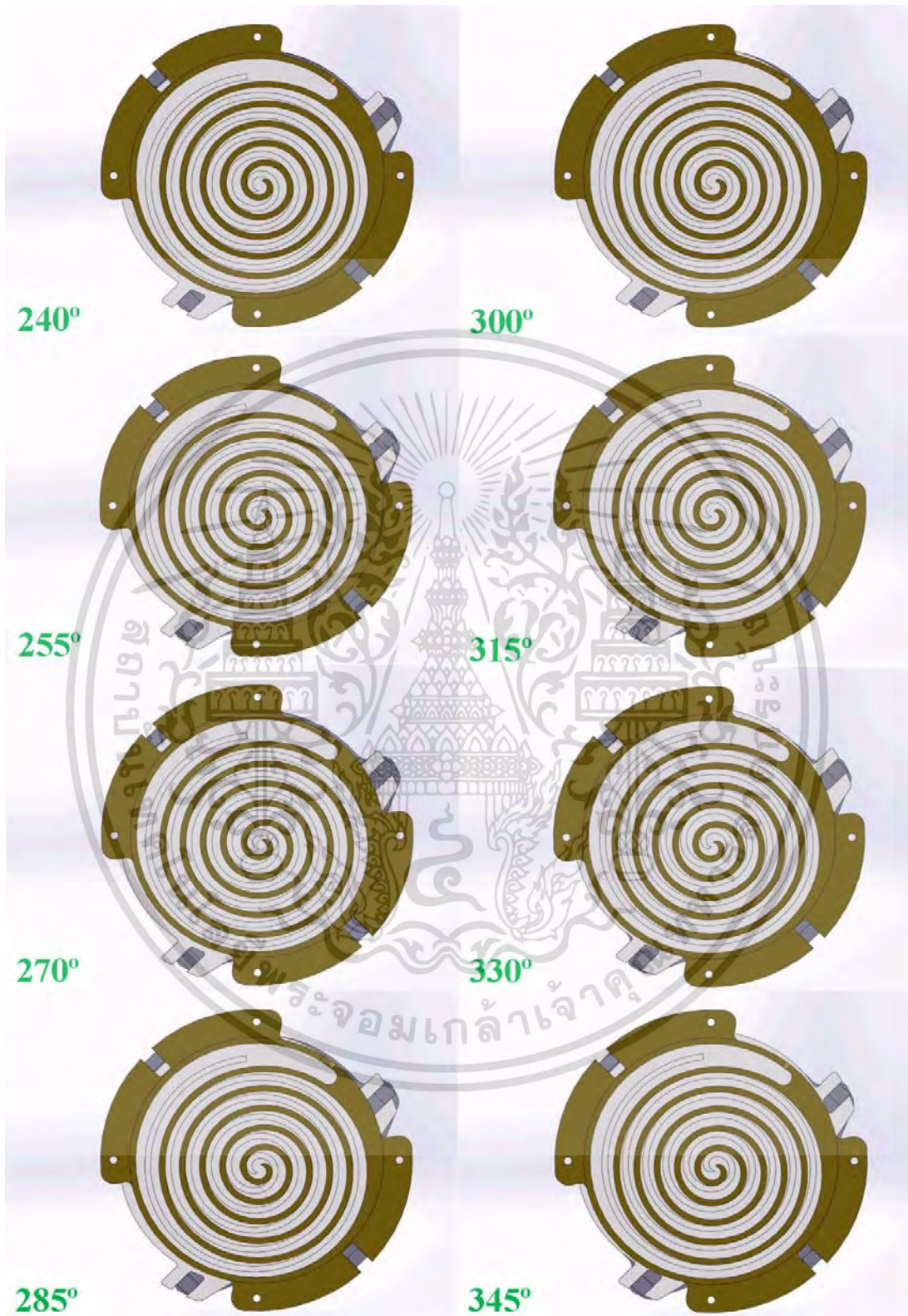


Fig. 4.30 Clock Wise motion in top section view of Scroll Expander in 240 – 345 degree

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 Create Scroll Expander Manufacturing Process in CAM

4.6.1 Create CAM files of 4 key parts by ZW3D

After have CAD files from SolidWorks, the author converts these files to be Z3 in ZW3D before sets up the reference point and creates stock of raw material as in Fig. 4.31.



Fig. 4.31 Create stock of raw material

After that, sets up the operation process such as Top Facing, Spiralcut, Profilecut and Drill. In each operation, need to set up Features, Class, Tool and Parameters. Fig. 4.32 shows the example of Top Facing operation.

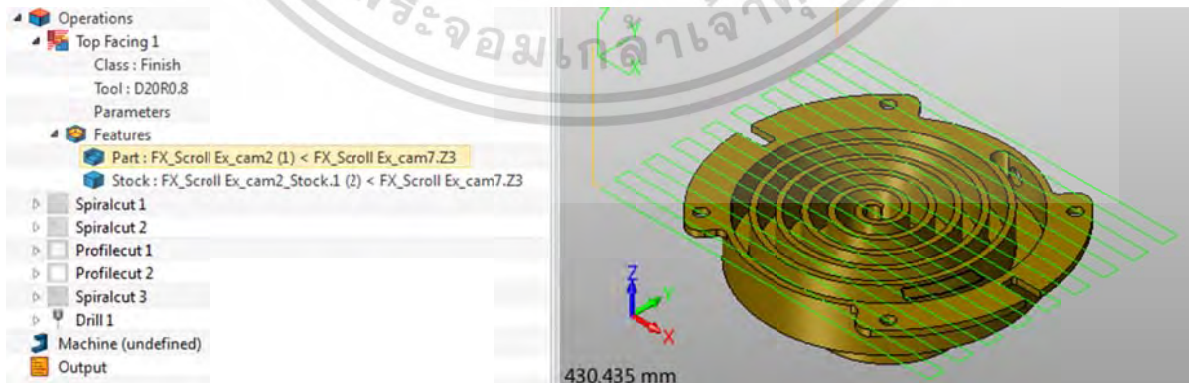


Fig. 4.32 Top Facing operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Consequently, the author sets up another operation process, Spiralcut, Profilecut and Drill similarly. Verify each operation to check tool path for the complete work. Sometime, there are some residuals of work piece need to be machined again. In this case, exits CAM monitor and write the area to be rework in CAD monitor. Then comes back to CAM again and sets up the operation. Fig. 4.33 shows the rework of Spiralcut operation.

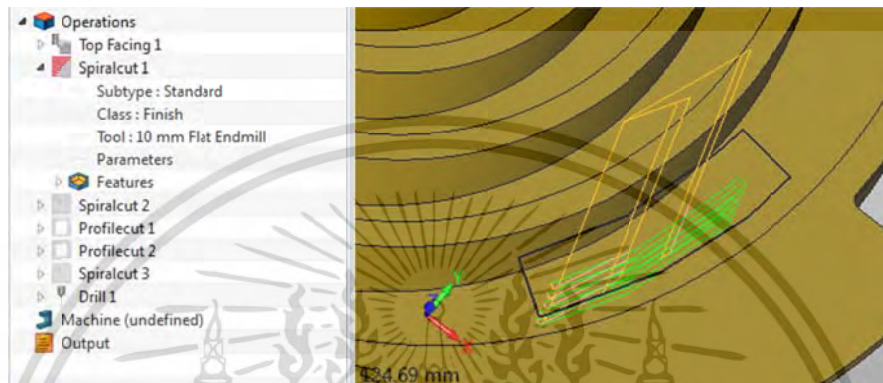


Fig. 4.33 The rework of Spiralcut operation

Finally, Solid Verify command will be used to simulate the machining process and Output NC for all command will be used to create NC codes for machining center. Fig. 4.34 to Fig. 4.40 shows the example of Solid Verify in each work piece and plenty of NC codes.



Fig. 4.34 Solid Verify of Fixed Scroll Expander (Front)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

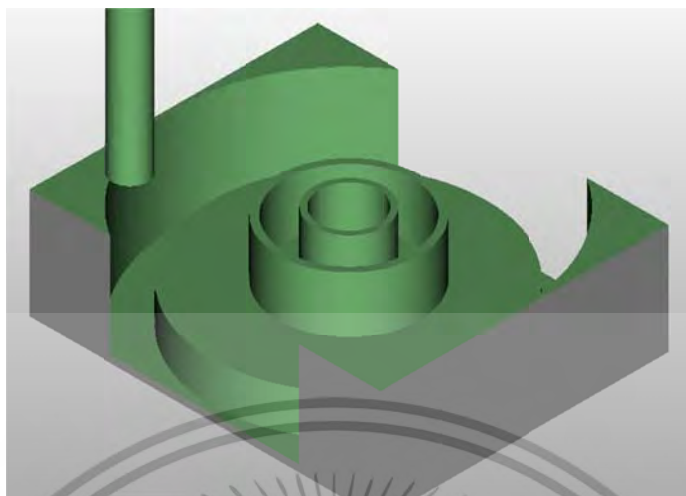


Fig. 4.35 Solid Verify of Fixed Scroll Expander (Back)



Fig. 4.36 Solid Verify of Orbiting Scroll Expander (Front)

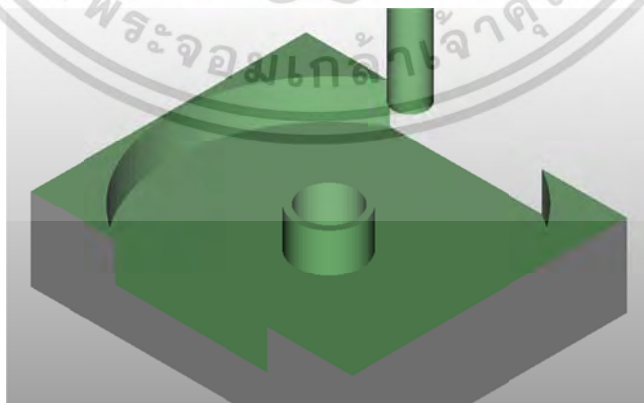


Fig. 4.37 Solid Verify of Orbiting Scroll Expander (Back)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig. 4.38 Solid Verify of Oldham Joint (Front)



Fig. 4.39 Solid Verify of Thrust Bearing (Front)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%	N34 Y2.7109 F1600.	N68 G01 X300.3728 Y-40.4717 Z-5.2721 F400.
N1 G40 G17 G94 G49 G90 G21 G54	N35 X95.1697 F2000.	N69 X299.3418 Y-39.8017 Z-5.982
N2 G91 G28 Z0.0	N36 Y-9.3667 F1600.	N70 X299.3156 Y-39.7846 Z-6.
N3 G28 X0.0 Y0.0	N37 X368.8942 F2000.	N71 X299.3418 Y-39.8017 F800.
N4 G90 A0.0 C0.0	N38 Y-21.4443 F1600.	N72 X300.3728 Y-40.4717
N5 T1 M06	N39 X95.1697 F2000.	N73 X308.8954 Y-25.6875
N6 T0	N40 Y-33.5218 F1600.	N74 X313.9721 Y-9.3539
N7 G43.4 H1	N41 X368.8942 F2000.	N75 X314.6468 Y-4.2935
N8 S2500 M03	N42 Y-45.5994 F1600.	N76 X312.8377 Y-4.0764
N9 G05.1 Q1	N43 X95.1697 F2000.	N77 X312.617 Y-5.566
N10 M08	N44 Y-57.677 F1600.	N78 X312.492 Y-6.1591
N11 G90 G00 X86.6697 Y111.409	N45 X368.8942 F2000.	N79 X307.358 Y-24.828
N12 Z100.	N46 Y-69.7545 F1600.	N80 X306.9265 Y-25.8965
N13 Z4.5	N47 X95.1697 F2000.	N81 X299.3418 Y-39.8017
N14 G01 Z2.5 F3000.	N48 Y-81.8321 F1600.	N82 X300.3728 Y-40.4717
N15 Z0 F400.	N49 X368.8942 F2000.	N83 X308.8954 Y-25.6875
N16 X95.1697	N50 Y-93.9097 F1600.	N84 X313.9721 Y-9.3539
N17 X368.8942 F800.	N51 X95.1697 F2000.	N85 X314.6468 Y-4.2935
N18 Y99.3314 F1600.	N52 X38.6697 F6000.	N86 X312.8377 Y-4.0764
N19 X95.1697 F2000.	N53 G00 Z100.	N87 X312.617 Y-5.566
N20 Y87.2539 F1600.	N54 M09	N88 X312.492 Y-6.1591
N21 X368.8942 F2000.	N55 G05.1 Q0	N89 X307.358 Y-24.828
N22 Y75.1763 F1600.	N56 G49	N90 G17 G02 X306.9265 Y-25.8965 I4.821 J1.3258
N23 X95.1697 F2000.	N57 G91 G28 Z0.0	N91 G01 X299.3418 Y-39.8017
N24 Y63.0987 F1600.	N58 G28 X0.0 Y0.0	N92 X300.3728 Y-40.4717 F6000.
N25 X368.8942 F2000.	N59 M06	N93 X300.7575 Y-39.8043
N26 Y51.0212 F1600.	N60 T0	N94 G00 Z100.
N27 X95.1697 F2000.	N61 G43.4 H1	N95 X307.0959 Y-28.8092
N28 Y38.9436 F1600.	N62 S2500 M03	N96 Z-3.5
N29 X368.8942 F2000.	N63 G05.1 Q1	N97 G01 X300.3728 Y-40.4717 Z-11.2721 F400.
N30 Y26.866 F1600.	N64 M08	N98 X299.3418 Y-39.8017 Z-11.982
N31 X95.1697 F2000.	N65 G90 G00 X307.0959 Y-28.8092	N99 X299.3156 Y-39.7846 Z-12.
N32 Y14.7885 F1600.	N66 Z100.	N100 X299.3418 Y-39.8017 F800.
N33 X368.8942 F2000.	N67 Z2.5	N101 X300.3728 Y-40.4717

Fig. 4.40 Some NC code of Fixed Scroll Expander (Front)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chapter 5

Conclusion and Suggestion

5.1 Conclusion

The optimal values of the design variables of the scroll expander wrap for organic Rankine cycle (ORC) power generation were acquired numerically under the required thickness and height of scroll wrap. Expansion ratio in term of volume ratio and its constraints were analyzed using linear programming methods, nonlinear interior point algorithms and utilize second derivatives by FindMaximum (Wolfram command). The maximum built-in volume ratio is 5.7155 (volume ratio increase 44.3%) at base circle radius r_b 2.4756 mm, inner ending involute angle φ_{ie} 34.4345 radian (5.4804 involute cycle), while thickness and height were set up to 4.56 mm and 28.65 mm accordingly. These 2 variables were chosen to control their dimensions to be compared with the reference scroll.

In order to proof the optimum design procedure, the comparison with another ORC scroll expanders were used for checking. The higher built-in volume ratio of optimum design shows the effective of this method.

The result of this work can be considered as the first process of ORC system design to maximize performance of expander machine corresponding to the built in volumetric ratio within the desired dimension. It is helpful for the design of scroll expanders wrap and prediction of the whole ORC system performance.

Nevertheless, this work can be answered the 3 research questions as the follow:

1. Proof the method to find the maximum power output of scroll expander wrap compare with the standard scroll wrap of Wincent Lemort [4].
2. Proof the procedure of scroll expander design to create the best performance wrap and make it to be 3 dimensions model in CAD file.
3. Show the method to develop the model to be prototype in CAM file.

Finally, the result of this work can be satisfied research objectives as the follow:

1. The optimum dimensions of scroll expander wrap which satisfy the maximum built-in volume ratio 5.7155 for the same 180 mm diameter and 28.65 mm height as the reference scroll.
2. Show the solution from optimum methodology leads to develop the new scroll wrap and its prototype.
3. Wolfram Mathematica software has been used to plot the pair of scroll wrap from scroll geometry theory.

4. The set of 2 dimensions coordinates from Wolfram Mathematica can be transfer to CAD software, Solidworks more than 14,000 points.
5. Uses Solidworks to develop 4 key parts of scroll mechanism, fixed scroll, orbiting scroll, Oldham joint and thrust bearing. Furthermore, can develop the scroll assembly simulation.
6. The machining process of scroll expander in CAM software, ZW3D has been introduced in this work

5.2 Suggestion

The real prototype and manufacturing can be developed from knowhow in this research. Nevertheless, there are some criteria need to be concerned for the better performance of next scroll expander. Instead of uses cast iron for the material of mass production, uses the composite material for the orbiting scroll can decrease body mass for the higher rotation speed.

Next idea for product development is fitting the last portion before exhaust. To increase efficiency of this machine from the reducing of residual pressure as in Fig. 4.12 is to derivate the curve points of fixed scroll and orbiting scroll separately. For orbiting scroll wrap, uses the same method of the current fixed scroll as in topic 4.5.1 and creates 3 dimensions of Scroll Expander Wrap. But for the new fixed scroll, extends inner ending involute angle, φ_{ie} to be same as the position of exhaust hole. This method can creates the complete matching curve between 2 scroll wraps.

With respect to a paragraph in chapter 4, “the built-in volume ratio varies with pressure ratio. Fadhel Ayachi’s experiment shows the net electrical power output increases with the increase of the pressure ratio as well as the increase of the supply pressure and the net efficiency close to 70% after pressure ratio over 3.0 [19]. This leads to the brake horse power increases with the increase of the pressure ratio after pressure ratio over 3.0.” leads to the next interesting research. Why isentropic efficiency varies with pressure ratio after pressure ratio over 3.0? Vincent Lemort [20] has the similar result, isentropic effectiveness close to 0.7 after pressure ratio over 3.0. What is significant in pressure ratio over 3.0?

References

- [1] L. Creux. **Rotary engine**. USA. US Patent. No. 801182. 1905.
- [2] Baolong Wang, Xianting Li, Wenxing Shi (2005). “A general geometrical model of scroll compressors based on discretional initial angles of involute.” **International Journal of Refrigeration**. vol.28 (2005), pp. 958–966.
- [3] Bell, Ian H., Groll, Eckhard A., Braun, James E., and Horton, W. Travis (2012). “Derivation of Optimal Scroll Compressor Wrap for Minimization of Leakage Losses,” **International Compressor Engineering Conference (2012)**. Paper 2111.
- [4] Vincent Lemort, Sylvain Quoilin, Jean Lebrun (2008). “Numerical Simulation of a scroll expander for use in a rankine cycle.” **International Compressor Engineering Conference at Purdue**. July 14-17, 2008.
- [5] Kyoungwoo Park, Seungjae Moon (2005). “Optimal design of heat exchangers using the progressive quadratic response surface model.” **International Journal of Heat and Mass Transfer**. vol.48 (2005), pp. 2126–2139.
- [6] Jiangfeng Wang, Zhequan Yan, Man Wang, Maoqing Li, Yiping Dai (2013). “Multi-objective optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using evolutionary algorithm.” **Energy Conversion and Management**. vol.71 (2013), pp. 146–158.
- [7] Xueyi Li, Shoubo Jiang and Qingliang Zeng (2013). “Optimization of Two-Stage Cylindrical Gear Reducer with Adaptive Boundary Constraints.” **Journal of Software**. vol.8, no. 8, August 2013, pp. 2052-2057.
- [8] Wolfram LLC. 2018. **Wolfram Mathematica Optimization**. :[Online] Available: <https://www.wolfram.com>.
- [9] Zhu Wu, Deng Pan, Naiping Gao, Tong Zhu, Feibo Xie (2015). “Experimental testing and numerical simulation of scroll expander in a small scale organic Rankine cycle system.” **Applied Thermal Engineering**. vol.87 (2015), pp. 529-537.

- [10] Jen-Chieh Chang, Chao-Wei Chang, Tzu-Chen Hung, Jaw-Ren Lin, Kuo-Chen Huang (2014). “Experimental study and CFD approach for scroll type expander used in low-temperature organic Rankine cycle.” **Applied Thermal Engineering**. vol.73 (2014), pp. 1444-1452.
- [11] Xinjing Zhang, Yujie Xu, Jian Xu, Yong Sheng, Zhitao Zuo, Jimin Liu, Haisheng Chen, Yaodong Wang, Ye Huang (2017). “Study on the performance and optimization of a scroll expander driven by compressed air.” **Applied Energy**. Volume 186 (2017), Pages 347-358.
- [12] Sébastien Declaye, Sylvain Quoilin, Ludovic Guillaume, Vincent Lemort (2013). “Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) system with R245fa as working fluid.” **Energy**. vol.55 (2013), pp. 173-183.
- [13] Sylvain Quoilin , Martijn Van Den Broek, Sébastien Declaye , Pierre Dewallef, Vincent Lemort (2013). “Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems.” **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. vol. 22 (2013), pp. 168–186.
- [14] TestEquity LLC. 2018. **How a Scroll Compressor Works**. :[Online] Available: <https://www.testequity.com>.
- [15] Rémi DICKES (2013). “Design and fabrication of a variable wall thickness two-stage scroll Expander to be integrated in a micro-solar power plant.” **Master thesis submitted on August 20th 2013 to the Faculty of Applied Sciences of the University of Liège in partial fulfillment for the requirements for the degree of Electromechanical Engineer**.
- [16] Zhu Wu, Deng Pan, Naiping Gao, Tong Zhu, Feibo Xie (2015). “Experimental testing and numerical simulation of scroll expander in a small scale organic Rankine cycle system.” **Applied Thermal Engineering**. vol. 87 (2015), pp. 529-537.
- [17] Knut O. Kverneland. **METRIC STANDARDS for Worldwide Manufacturing**. 2012 Edition.

- [18] M. Kane, D. Larrain, D. Favrat, Y. Allani, (2003). "Small hybrid solar power system." **Energy**. vol. 28 (2003), pp. 1427-1443.
- [19] Fadhel Ayachi, Elias Boulawz Ksayer, Pierre Neveu, Assaad Zoughaib (2016). "Experimental investigation and modeling of a hermetic scroll expander." **Applied Energy**. vol. 181 (2016), pp. 256-267.
- [20] V. Lemort*, S. Declaye, and S. Quoilin (2013). "Experimental characterization of a hermetic scroll expander for use in a micro-scale Rankine cycle." **Power and Energy**. vol.226 (2012), pp. 126-136.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Appendix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(*Optimum Design of Scroll Expander for the Maximun Power Generation*)

(*Vratio = Objective function*)

(*2Vcd = $(-2\pi \cdot hs \cdot rb \cdot ro) \cdot (-2\phi os - 3\pi + \phi i0 + \phi o0)$ *)

(*Vdisp = Vratio*(2Vcd)*)

(*rb = Variable1*)

(*ts = Constant*)

(*ro = $rb \cdot \pi - ts$ *)

(*hs = Constant*)

(* $\phi i0 = 0$ *)

(* $\phi o0 = -ts/rb$ *)

(* $\phi os = 1.57 - ts/rb$ *)

(* $\phi is = 3.5 - ts/rb$ *)

(* $\phi ie = Variable2$ *)

(*Roe = $rb + rb \cdot \phi ie + ts/2$ *)

(*f = Objective Function = Maximize Vratio*)

(*c1 = Constraint 1 : h1 : Relationship between hs & Vdisp*)

(*c2 = Constraint 2 : g1 : Within Allowable Scroll Radius, $Roe \leq 90$ *)

(*c3 = Constraint 3 : g2 : Under Limited $hs \leq 12ts$ *)

(*c4 = Constraint 4 : g3 : Acceptable $hs \geq 2rb$ *)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ClearAll[Vdisp, rb,  $\phi$ ie, ts, hs, ro,  $\phi$ i0,  $\phi$ o0,  $\phi$ os, Roe,  $\phi$ is, Vcd, Vratio];

ts = 4.56; hs = 28.65; ro = rb *  $\pi$  - ts;  $\phi$ i0 = 0;  $\phi$ o0 = -ts / rb;
 $\phi$ os = 1.57 - ts / rb; Roe = rb + rb *  $\phi$ ie + ts / 2;  $\phi$ is = 3.5 - ts / rb;

Vratio = FindMaximum[{(3  $\pi$  - 2  $\phi$ ie +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0),
  hs == ((-2  $\pi$  * hs * rb * ro) * (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0)) /
  ((2  $\pi$  * rb^2) * ( $\pi$  +  $\phi$ o0) * (2  $\phi$ os + 3  $\pi$  -  $\phi$ i0 -  $\phi$ o0)) &&
  Roe  $\leq$  90 && hs  $\leq$  12 * ts && hs  $\geq$  2 rb && ro  $\geq$  0 && rb  $\geq$  0 &&  $\phi$ ie  $\geq$  0},
  {{rb, 2.50}}, {{ $\phi$ ie, 18}}, PrecisionGoal  $\rightarrow$  6];
Print["Maximum Vratio = ", Vratio]

rb = 2.4755546332443448^;  $\phi$ ie = 34.43448355262709^;
Vcd = (-2  $\pi$  * hs * rb * ro) * (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / 2;
Vratio = (3  $\pi$  - 2  $\phi$ ie +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / (-2  $\phi$ os - 3  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0);
Vdisp = Vratio * (2 Vcd);

Print["When rb = ", rb]
Print["When  $\phi$ ie = ",  $\phi$ ie]
Print["At ts = ", ts]
Print["At hs = ", hs]
Print["At ro = ", ro]
Print["At  $\phi$ i0 = ",  $\phi$ i0]
Print["At  $\phi$ o0 = ",  $\phi$ o0]
Print["At  $\phi$ os = ",  $\phi$ os]
Print["At  $\phi$ is = ",  $\phi$ is]
Print["At Roe = ", Roe]
Print["Get 2Vcd = ", 2 Vcd]
Print["Get Vratio = ", Vratio]
Print["Get Vdisp = ", Vdisp]

Maximum Vratio = {5.71552, {rb  $\rightarrow$  2.47555,  $\phi$ ie  $\rightarrow$  34.4345}}
When rb = 2.47555
When  $\phi$ ie = 34.4345
At ts = 4.56
At hs = 28.65
At ro = 3.21718
At  $\phi$ i0 = 0
At  $\phi$ o0 = -1.84201
At  $\phi$ os = -0.272011
At  $\phi$ is = 1.65799
At Roe = 90.
Get 2Vcd = 15373.
Get Vratio = 5.71552
Get Vdisp = 87864.9

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

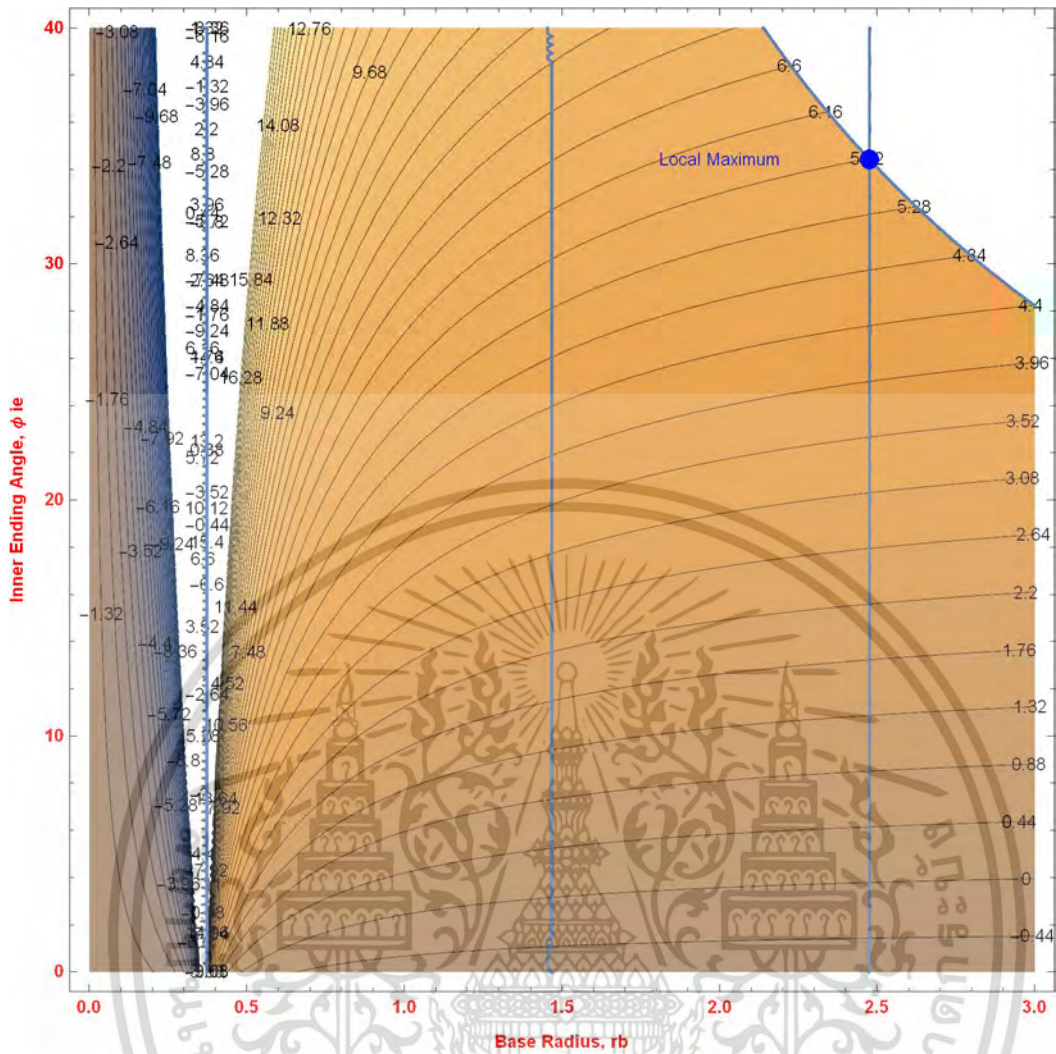
```
ClearAll[Vdisp, rb,  $\phi$ ie, ts, hs, ro,  $\phi$ i0,  $\phi$ o0,  $\phi$ os, Roe, Vcd, Vratio];
```

```
ts = 4.56; hs = 28.65; ro = rb *  $\pi$  - ts;  $\phi$ i0 = 0;
 $\phi$ o0 = -ts / rb;  $\phi$ os = 1.57 - ts / rb; Roe = rb + rb *  $\phi$ ie + ts / 2;
Vcd = (-2 *  $\pi$  * hs * rb * ro) * (-2 *  $\phi$ os - 3 *  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / 2;
Vratio = (3 *  $\pi$  - 2 *  $\phi$ ie +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / (-2 *  $\phi$ os - 3 *  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0);
Vdisp = Vratio * (2 * Vcd);
```

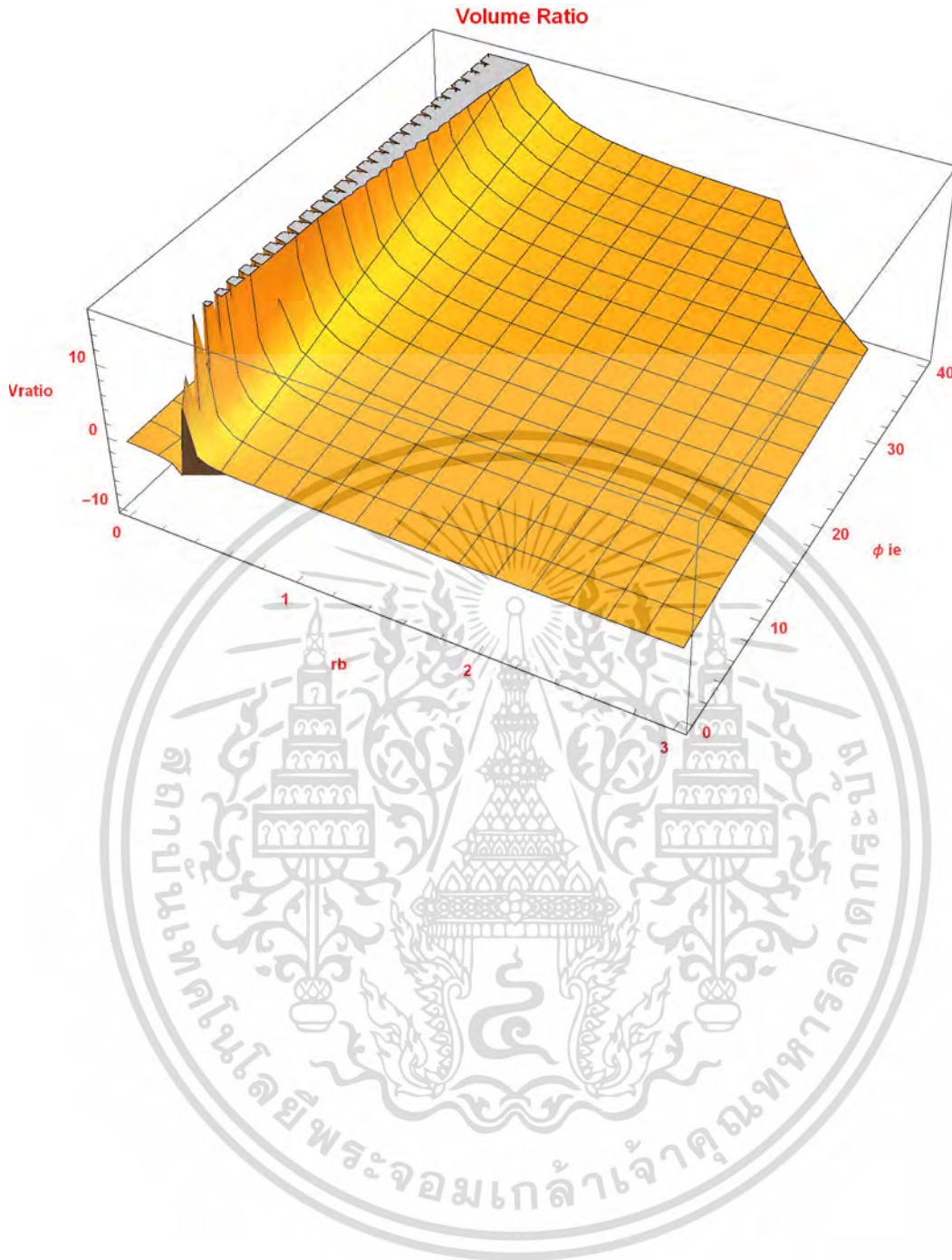
```
f = ContourPlot[{{(3 *  $\pi$  - 2 *  $\phi$ ie +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / (-2 *  $\phi$ os - 3 *  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0)}, {rb, 0, 3},
  { $\phi$ ie, 0, 40}, RegionFunction -> (#1 + #1 * #2 + ts / 2 <= 90 &), Contours -> 60, Epilog ->
  ({Blue, PointSize[.02], Text["Local Maximum", {2.0, 34.43448355262709`}]},
  Point[{2.4755546332443448`, 34.43448355262709`}])], ContourLabels -> True,
  Frame -> True, FrameLabel -> {"Base Radius, rb", "Inner Ending Angle,  $\phi$  ie"},
  LabelStyle -> Directive[Red, Bold]];
p1 = ContourPlot[hs == 15373 / ((2 *  $\pi$  * rb^2) * ( $\pi$  +  $\phi$ o0) * (2 *  $\phi$ os + 3 *  $\pi$  -  $\phi$ i0 -  $\phi$ o0)),
  {rb, 0, 3}, { $\phi$ ie, 0, 40}];
p2 = ContourPlot[rb + rb *  $\phi$ ie + ts / 2 == 90, {rb, 0, 3}, { $\phi$ ie, 0, 40}];
Show[f, p1, p2]

k = Plot3D[{{(3 *  $\pi$  - 2 *  $\phi$ ie +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0) / (-2 *  $\phi$ os - 3 *  $\pi$  +  $\phi$ i0 +  $\phi$ o0)}, {rb, 0, 3}, { $\phi$ ie, 0, 40},
  RegionFunction -> (#1 + #1 * #2 + ts / 2 <= 90 &), AxesLabel -> {"rb", " $\phi$  ie", "Vratio"},
  PlotLabel -> "Volume Ratio", LabelStyle -> Directive[Red, Bold]];
Show[k]
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Appendix B.

The Pair of Scroll Wrap Program

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
In[690]:= (* New_Profile_Synchronized_Cycle *)
(* Kritsada Lowrungsi 56601145 *)
```

```
(*Optimum Design of Scroll Expander for the Maximun Power Generator*)
(*The profiles of the scroll with discretional initial angles*)
```

```
ClearAll[ts, rb,  $\phi_{ie}$ ,  $\phi_{ie}$ ,  $\phi_{i0}$ ,  $\phi_{o0}$ , tor, ro, Roe,  $\alpha_i$ ,  $\alpha_o$ , a,  $\phi_{is}$ , xos, yos, xis, yis,
xcircle0, ycircle0,  $\phi_{os}$ , R1, R2, dR, Ravg, pcircle0, xoe, yoe, xie, yie,  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,
m, xmove12, ymove12, xmove11, ymove11, xmove22, ymove22, xmove21, ymove21,
xmove32, ymove32, xmove31, ymove31, xmove42, ymove42, xmove41, ymove41]
```

```
(*Parameter 1*)
```

```
(*Primary Parameter*)
```

```
ts = 4.56; (*scroll thickness*)
rb = 2.47555; (*radius of the basic circle*)
 $\phi_{ie} = 34.4345$ ; (* $\phi_{ie}$ =Objective function in optimization process,
We will use the fixed difference,
 $\phi_o - \phi_{o0} = \phi_i - \phi_{i0}$  or  $\phi_i = \phi_o + \alpha_i$ ;  $\alpha_i = 0$  in the plot calculation*)
```

```
(*Secondary Parameter*)
```

```
 $\phi_{oe} = \phi_{ie}$ ; (*For the same ending as  $\phi_{ie}$  and in the calculation,
we will use  $\phi_o$  for the main variable*)
```

```
 $\phi_{i0} = 0$ ; (* $\phi_{i0} = 0$  but exception for this case*)
 $\phi_{o0} = -ts / rb$ ; (* $\phi_{o0} = (-ts / rb)$  ;  $(ts / rb) = (\alpha_i - \alpha_o) = (\phi_{i0} - \phi_{o0})$ *)
```

```
tor = ts / rb;
ro = rb *  $\pi - ts$ ; (* $ro = (rb * \pi - ts)$ *)
Roe = rb + rb *  $\phi_{ie} + ts / 2$ ;
```

```
 $\alpha_i = \phi_{i0}$ ;
 $\alpha_o = \phi_{o0}$ ;
a = rb;
```

```
 $\phi_{is} = \pi - (\alpha_i - \alpha_o) / 2$ ; (* $\phi_{is} = \text{approx} \dots (\pi - (\alpha_i - \alpha_o) / 2)$ *)
```

```
(*For outer involute,*)
```

```
(* $\phi_{os} < \phi_o < \phi_{oe}$  ;*)
```

```
(* $x_o = a * (\cos(\phi_o + \alpha_o) + \phi_o * \sin(\phi_o + \alpha_o))$  ;*)
```

```
(* $y_o = a * (\sin(\phi_o + \alpha_o) - \phi_o * \cos(\phi_o + \alpha_o))$  ;*)
```

```
(*For inner involute,*)
```

```
(* $\phi_{is} < \phi_i < \phi_{ie}$  ;*)
```

```
(* $x_i = a * (\cos(\phi_i + \alpha_i) + \phi_i * \sin(\phi_i + \alpha_i))$  ;*)
```

```
(* $y_i = a * (\sin(\phi_i + \alpha_i) - \phi_i * \cos(\phi_i + \alpha_i))$  ;*)
```

```
(*Parameter 2*)
```

```
xos = a * (Cos[ $\phi_{os} + \alpha_o$ ] +  $\phi_{os} * \text{Sin}[\phi_{os} + \alpha_o]$ );
```

```
yos = a * (Sin[ $\phi_{os} + \alpha_o$ ] -  $\phi_{os} * \text{Cos}[\phi_{os} + \alpha_o]$ );
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

xis = a * (Cos[φis + αi] + φis * Sin[φis + αi]);
yis = a * (Sin[φis + αi] - φis * Cos[φis + αi]);

xcircle0 = a * Cos[π + (αi + αo) / 2];
ycircle0 = a * Sin[π + (αi + αo) / 2];

Clear[φos]

FindRoot[{(xis - xcicle0)^2 + (yis - ycicle0)^2 ==
  ((a * (Cos[φos + αo] + φos * Sin[φos + αo])) - xcicle0)^2 +
  ((a * (Sin[φos + αo] - φos * Cos[φos + αo])) - ycicle0)^2},
{φos, 1}, PrecisionGoal → 4]

φos = 0.9432;
(*From the trial and error to have R2=R1 in the interaction arc*)

R1 = Sqrt[(xis - xcicle0)^2 + (yis - ycicle0)^2];
R2 = Sqrt[(xos - xcicle0)^2 + (yos - ycicle0)^2];
dR = R1 - R2;
(*Check R2 must equalto R1. If not adjust φos and re-calculation*)
Ravg = (R1 + R2) / 2;

(*"Cartesian"→"Polar",{xcicle0,ycicle0}={Rcicle0,θcicle0}*)
pcircle0 = CoordinateTransformData[
  {"Cartesian" → "Polar"}, "Mapping", {xcicle0, ycicle0}];

(*Parameter 3*)
xoe = a * (Cos[φoe] + (φoe - φo0) * Sin[φoe]);
yoe = a * (Sin[φoe] - (φoe - φo0) * Cos[φoe]);

xie = a * (Cos[φie] + (φie - φi0) * Sin[φie]);
yie = a * (Sin[φie] - (φie - φi0) * Cos[φie]);

(*Print all paraneter*)
Print["ts = ", ts]
Print["rb = ", rb]

Print["φoe = ", φoe]
Print["φie = ", φie]

Print["φo0 = ", φo0]
Print["φi0 = ", φi0]

Print["tor = ", ts / rb]
Print["ro = ", ro]
Print["Roe = ", Roe ]

Print["αo = ", αo]
Print["αi = ", αi]
Print["a = ", a]

```

```

Print[" $\phi_{os}$  = ",  $\phi_{os}$ ]
Print[" $\phi_{is}$  = ",  $\phi_{is}$ ]

Print[" $x_{os}$  = ",  $x_{os}$ ]
Print[" $y_{os}$  = ",  $y_{os}$ ]
Print[" $x_{is}$  = ",  $x_{is}$ ]
Print[" $y_{is}$  = ",  $y_{is}$ ]

Print[" $x_{circle0}$  = ",  $x_{circle0}$ ]
Print[" $y_{circle0}$  = ",  $y_{circle0}$ ]

Print["R1 = ", R1]
Print["R2 = ", R2]
Print["dR = ", dR]
Print["Ravg = ", Ravg]

Print[" $p_{circle0}$  = ",  $p_{circle0}$ ]

Print[" $x_{oe}$  = ",  $x_{oe}$ ]
Print[" $y_{oe}$  = ",  $y_{oe}$ ]
Print[" $x_{ie}$  = ",  $x_{ie}$ ]
Print[" $y_{ie}$  = ",  $y_{ie}$ ]

```

```
Out[711]= { $\phi_{os}$  → 0.943201}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ts = 4.56
rb = 2.47555
 $\phi_{oe}$  = 34.4345
 $\phi_{ie}$  = 34.4345
 $\phi_{o0}$  = -1.84201
 $\phi_{i0}$  = 0
tor = 1.84201
ro = 3.21717
Roe = 89.9999
 $\alpha_o$  = -1.84201
 $\alpha_i$  = 0
a = 2.47555
 $\phi_{os}$  = 0.9432
 $\phi_{is}$  = 2.22059
xos = -0.286175
yos = -3.39093
xis = 2.87916
yis = 5.29695
xcircle0 = -1.49775
ycircle0 = 1.97106
R1 = 5.49717
R2 = 5.49717
dR =  $2.39572 \times 10^{-6}$ 
Ravg = 5.49717
pcircle0 = {2.47555, 2.22059}
xoe = 8.56297
yoe = 89.4294
xie = 8.00342
yie = 84.9039

```

In[751]:=

```

(*For interaction arc,*)
(* $\phi_{os} < \phi_n < \phi_{is}$ ;)*)
(* $x_t = R_1 \cos(\phi_t) + x_{circle0}$ ;)*)
(* $y_t = R_1 \sin(\phi_t) + y_{circle0}$ ;)*)
(*Calibrate a little number for the better curve*)

(*Plot all Graph*)

(*CCW Cycle is used for Expander Cycle*)
(*1.NE, 2.NW, 3.SW, 4.SE*)

```

เอกสาร (Cycle NE*) ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

β = 0;
δx = ro * Cos[φie + β]; (* Orbit Radius,
ro is the radius which control the orbit of moving scroll. *)
δy = ro * Sin[φie + β];
(* 2ro = 2πrb + 2ts and Cos[γ] = Cos[φie - 2nπ] = Cos[φie] *)
m = δy / δx;

co = ParametricPlot[{a * (Cos[φi + φo0] + φi * Sin[φi + φo0]) + δx,
  a * (Sin[φi + φo0] - φi * Cos[φi + φo0]) + δy}, {φi, φos, φie + tor},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)
ci = ParametricPlot[{a * (Cos[φi + φi0] + φi * Sin[φi + φi0]) + δx,
  a * (Sin[φi + φi0] - φi * Cos[φi + φi0]) + δy}, {φi, φis, φie},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]};
(*Remark: Use φi as a dummy for all curve from φi0=0 ...OK*)
ct = ParametricPlot[{(Ravg * Cos[φi] + xcircle0) + δx, (Ravg * Sin[φi] + ycircle0) + δy},
  {φi, φos - tor * 1.25, φis + φi0 - tor / 1.2},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]};
(*Remark: 1.28 is the calibration factor. ...OK*)
ce = ParametricPlot[
  {x, ((a * (Sin[(φie + tor) + φo0] - (φie + tor) * Cos[(φie + tor) + φo0]) + δy) -
    (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0]) + δy)) /
    ((a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0]) + δx) -
    (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]) + δx)) *
    (x - (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]) + δx)) +
    (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0]) + δy)},
  {x, a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]) + δx,
  a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0]) + δx},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)

do = ParametricPlot[
  {-a * (Cos[φi + φo0] + φi * Sin[φi + φo0]), -a * (Sin[φi + φo0] - φi * Cos[φi + φo0])},
  {φi, φos, φie + tor}, PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]};
(*...OK*)
di = ParametricPlot[{-a * (Cos[φi + φi0] + φi * Sin[φi + φi0]),
  -a * (Sin[φi + φi0] - φi * Cos[φi + φi0])}, {φi, φis, φie},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
dt = ParametricPlot[{- (Ravg * Cos[φi] + xcircle0), - (Ravg * Sin[φi] + ycircle0)},
  {φi, φos - tor * 1.25, φis + φi0 - tor / 1.2}, PlotRange → {-120, 120},
  PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
de = ParametricPlot[
  {-x, -(((a * (Sin[(φie + tor) + φo0] - (φie + tor) * Cos[(φie + tor) + φo0])) -
    (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0]))) /
    ((a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0])) -
    (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]))) *
    (x - (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]))) +
    (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0])))),
  {x, a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]),
  a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0])},
  PlotRange → {-120, 120},
  PlotStyle →

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)

Show[co, ci, ct, ce, do, di, dt, de]

(*Cycle NW*)
β = π / 2;
δx = ro * Cos[φie + β]; (* Orbit Radius,
ro is the radius which control the orbit of moving scroll. *)
δy = ro * Sin[φie + β];
(* 2ro = 2πrb + 2ts and Cos[γ] = Cos[φie - 2nπ] = Cos[φie] *)
m = δy / δx;

co = ParametricPlot[{a * (Cos[φi + φo0] + φi * Sin[φi + φo0]) + δx,
  a * (Sin[φi + φo0] - φi * Cos[φi + φo0]) + δy}, {φi, φos, φie + tor},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)
ci = ParametricPlot[{a * (Cos[φi + φi0] + φi * Sin[φi + φi0]) + δx,
  a * (Sin[φi + φi0] - φi * Cos[φi + φi0]) + δy}, {φi, φis, φie},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]};
(*Remark: Use φi as a dummy for all curve from φi0=0 ...OK*)
ct = ParametricPlot[{(Ravg * Cos[φi] + xcircle0) + δx, (Ravg * Sin[φi] + ycircle0) + δy},
  {φi, φos - tor * 1.25, φis + φi0 - tor / 1.2},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]};
(*Remark: 1.28 is the calibration factor. ...OK*)
ce = ParametricPlot[
  {x, ((a * (Sin[(φie + tor) + φo0] - (φie + tor) * Cos[(φie + tor) + φo0]) + δy) -
    (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0]) + δy)) /
    ((a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0]) + δx) -
    (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]) + δx)) *
    (x - (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]) + δx)) +
    (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0]) + δy)},
  {x, a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]) + δx,
  a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0]) + δx},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)

do = ParametricPlot[
  {-a * (Cos[φi + φo0] + φi * Sin[φi + φo0]), -a * (Sin[φi + φo0] - φi * Cos[φi + φo0])},
  {φi, φos, φie + tor}, PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]};
(*...OK*)
di = ParametricPlot[{-a * (Cos[φi + φi0] + φi * Sin[φi + φi0]),
  -a * (Sin[φi + φi0] - φi * Cos[φi + φi0])}, {φi, φis, φie},
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
dt = ParametricPlot[{- (Ravg * Cos[φi] + xcircle0), - (Ravg * Sin[φi] + ycircle0)},
  {φi, φos - tor * 1.25, φis + φi0 - tor / 1.2}, PlotRange → {-120, 120},
  PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
de = ParametricPlot[
  {-x, -(((a * (Sin[(φie + tor) + φo0] - (φie + tor) * Cos[(φie + tor) + φo0])) -
    (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0]))) /
    ((a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0])) -
    (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]))) *
    (x - (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]))) +

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

      (a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]))),
{x, a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]),
  a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0])},
PlotRange -> {-120, 120},
PlotStyle ->
  {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)

```

```
Show[co, ci, ct, ce, do, di, dt, de]
```

```
(*Cycle SW*)
```

```
 $\beta = \pi;$ 
```

```
 $\delta x = ro * Cos[phi + \beta];$  (* Orbit Radius,
ro is the radius which control the orbit of moving scroll. *)
```

```
 $\delta y = ro * Sin[phi + \beta];$ 
```

```
(* 2ro = 2 $\pi$ rb + 2ts and  $Cos[\gamma] = Cos[phi - 2n\pi] = Cos[phi]$  *)
```

```
 $m = \delta y / \delta x;$ 
```

```
co = ParametricPlot[{a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) +  $\delta x$ ,
  a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) +  $\delta y$ }, {phi, phi0, phi + tor},
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)
```

```
ci = ParametricPlot[{a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) +  $\delta x$ ,
  a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) +  $\delta y$ }, {phi, phi0, phi},
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]};
```

```
(*Remark: Use phi as a dummy for all curve from phi0=0 ...OK*)
```

```
ct = ParametricPlot[{(Ravg * Cos[phi] + xcircle0) +  $\delta x$ , (Ravg * Sin[phi] + ycircle0) +  $\delta y$ },
{phi, phi0 - tor * 1.25, phi0 + phi + tor / 1.2},
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]};
```

```
(*Remark: 1.28 is the calibration factor. ...OK*)
```

```
ce = ParametricPlot[
{x, ((a * (Sin[(phi + tor) + phi0] - (phi + tor) * Cos[(phi + tor) + phi0]) +  $\delta y$ ) -
  (a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) +  $\delta y$ )) /
  ((a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0]) +  $\delta x$ ) -
  (a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) +  $\delta x$ )) *
  (x - (a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) +  $\delta x$ )) +
  (a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) +  $\delta y$ )},
{x, a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) +  $\delta x$ ,
  a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0]) +  $\delta x$ },
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)
```

```
do = ParametricPlot[
{-a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]), -a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0])},
{phi, phi0, phi + tor}, PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0]};
(*...OK*)
```

```
di = ParametricPlot[{-a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]),
  -a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0])}, {phi, phi0, phi},
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
```

```
dt = ParametricPlot[{- (Ravg * Cos[phi] + xcircle0), - (Ravg * Sin[phi] + ycircle0)},
{phi, phi0 - tor * 1.25, phi0 + phi + tor / 1.2}, PlotRange -> {-120, 120},
PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
```

```
de = ParametricPlot[
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{-x, -(((a * (Sin[(phi + tor) + phi0] - (phi + tor) * Cos[(phi + tor) + phi0])) -
(a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]))) /
((a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0])) -
(a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]))) *
(x - (a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]))) +
(a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0])))),
{x, a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]),
a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0])},
PlotRange -> {-120, 120},
PlotStyle ->
{RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)

```

```
Show[co, ci, ct, ce, do, di, dt, de]
```

```
(*Cycle SE*)
```

```
 $\beta = 3\pi / 2;$ 
```

```
 $\delta x = ro * \text{Cos}[\phi i + \beta];$  (* Orbit Radius,
ro is the radius which control the orbit of moving scroll. *)
```

```
 $\delta y = ro * \text{Sin}[\phi i + \beta];$ 
```

```
(* 2ro = 2 $\pi$ rb + 2ts and  $\text{Cos}[\gamma] = \text{Cos}[\phi i - 2n\pi] = \text{Cos}[\phi i]$  *)
```

```
 $m = \delta y / \delta x;$ 
```

```
co = ParametricPlot[{a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) + delta x,
a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) + delta y}, {phi, phi0, phi + tor},
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)
```

```
ci = ParametricPlot[{a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) + delta x,
a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) + delta y}, {phi, phi0, phi},
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]};
```

```
(*Remark: Use phi as a dummy for all curve from phi0=0 ...OK*)
```

```
ct = ParametricPlot[{(Ravg * Cos[phi] + xcicle0) + delta x, (Ravg * Sin[phi] + ycicle0) + delta y},
{phi, phi0 - tor * 1.25, phi0 + phi + tor / 1.2},
```

```
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]};
```

```
(*Remark: 1.28 is the calibration factor. ...OK*)
```

```
ce = ParametricPlot[
{x, ((a * (Sin[(phi + tor) + phi0] - (phi + tor) * Cos[(phi + tor) + phi0]) + delta y) -
(a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) + delta y)) /
((a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0]) + delta x) -
(a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) + delta x)) *
(x - (a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) + delta x)) +
(a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]) + delta y)},
{x, a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]) + delta x,
a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0]) + delta x},
PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[0, 1, 0]}; (*...OK*)
```

```
do = ParametricPlot[
{-a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]), -a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0])},
{phi, phi0, phi + tor}, PlotRange -> {-120, 120}, PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0]};
(*...OK*)
```

```
di = ParametricPlot[{-a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]),
-a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0])}, {phi, phi0, phi},
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
dt = ParametricPlot[{- (Ravg * Cos[phi] + xcircle0), - (Ravg * Sin[phi] + ycircle0)},
  {phi, phi0 - tor * 1.25, phi0 + phi0 - tor / 1.2}, PlotRange → {-120, 120},
  PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
de = ParametricPlot[
  {-x, -(((a * (Sin[(phi + tor) + phi0] - (phi + tor) * Cos[(phi + tor) + phi0])) -
    (a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0]))) /
    ((a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0])) -
    (a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]))) *
    (x - (a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]))) +
    (a * (Sin[phi + phi0] - phi * Cos[phi + phi0])))),
  {x, a * (Cos[phi + phi0] + phi * Sin[phi + phi0]),
    a * (Cos[(phi + tor) + phi0] + (phi + tor) * Sin[(phi + tor) + phi0])},
  PlotRange → {-120, 120},
  PlotStyle →
  {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)

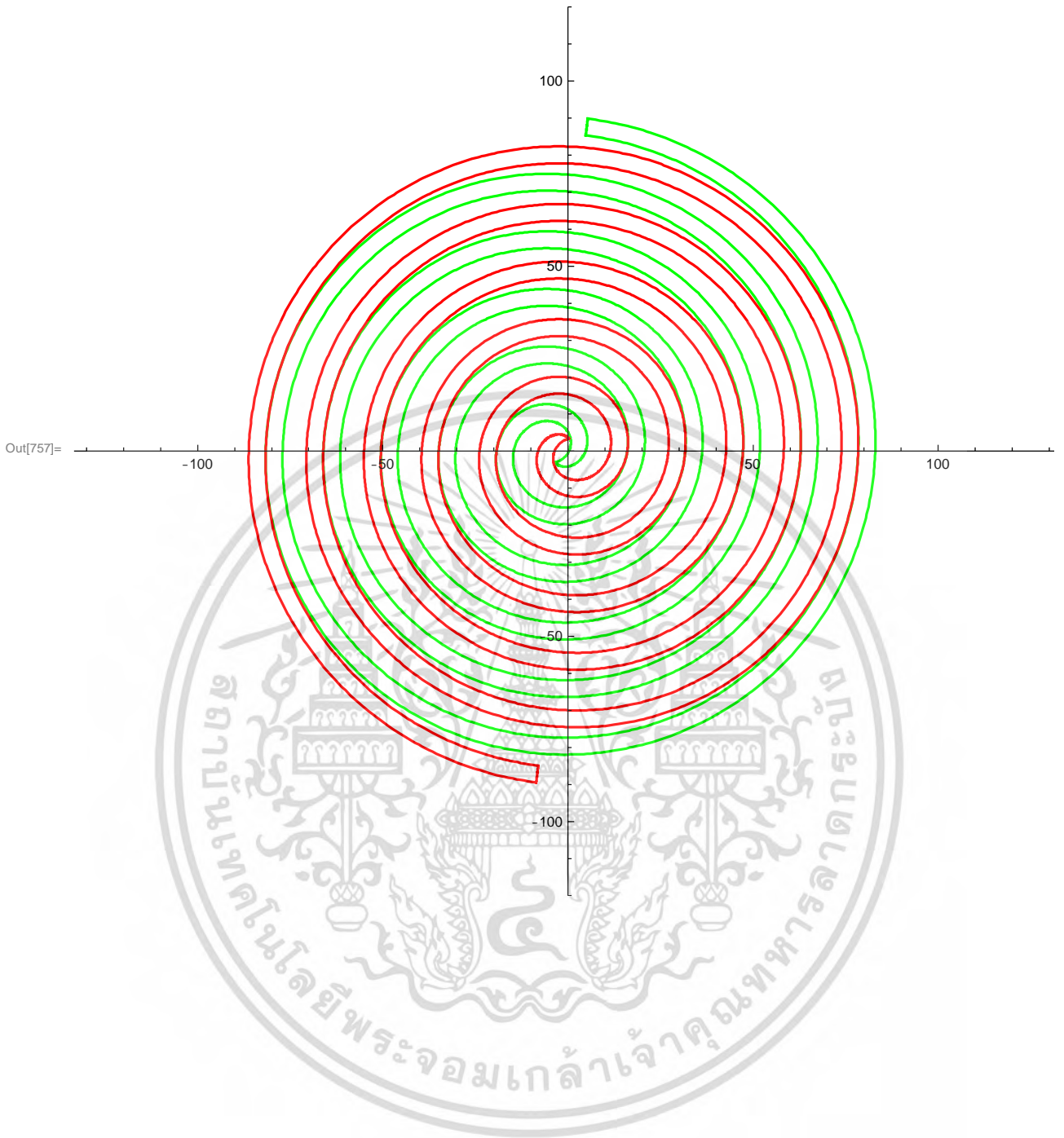
Show[co, ci, ct, ce, do, di, dt, de]

(*End*)

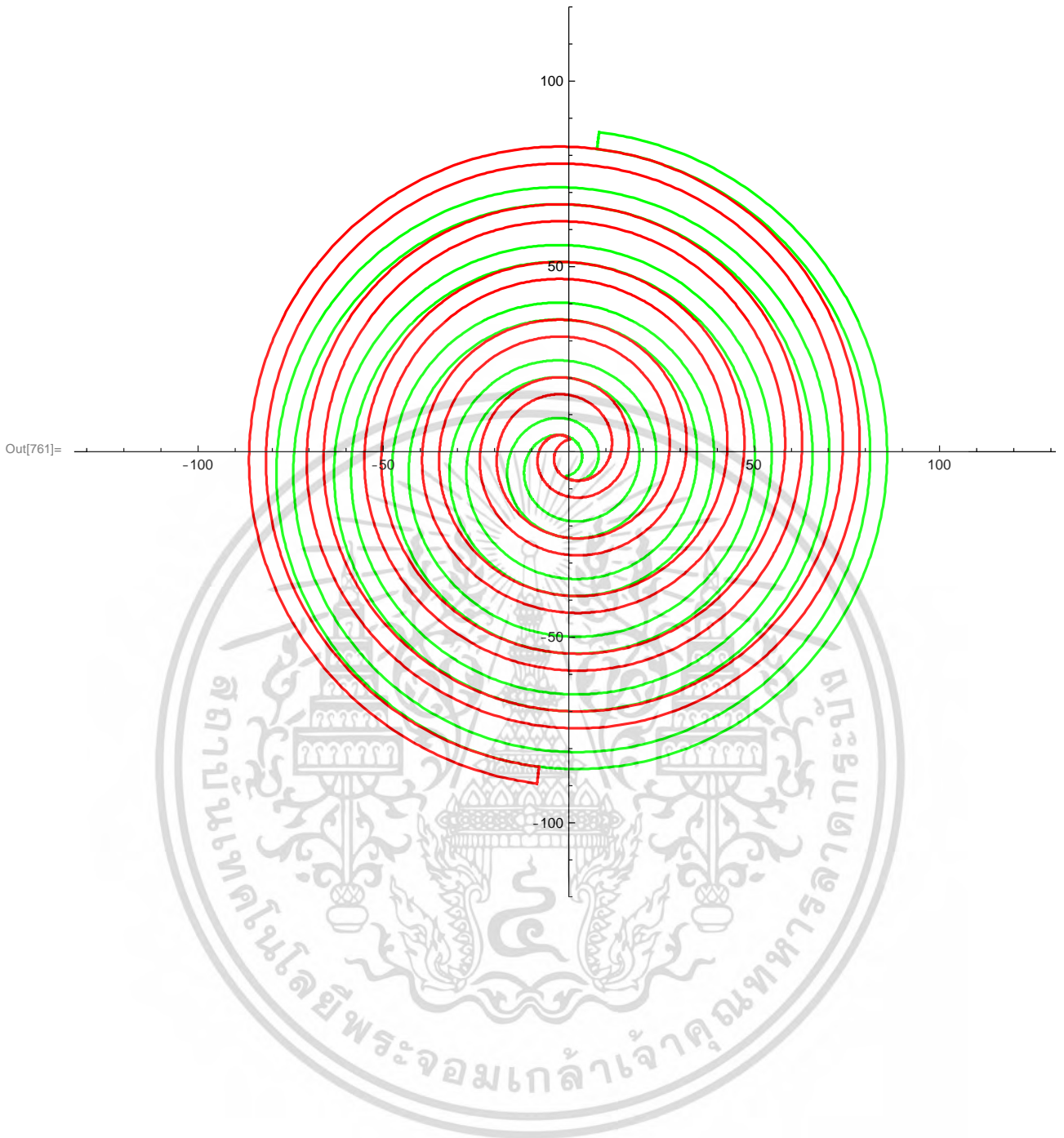
```



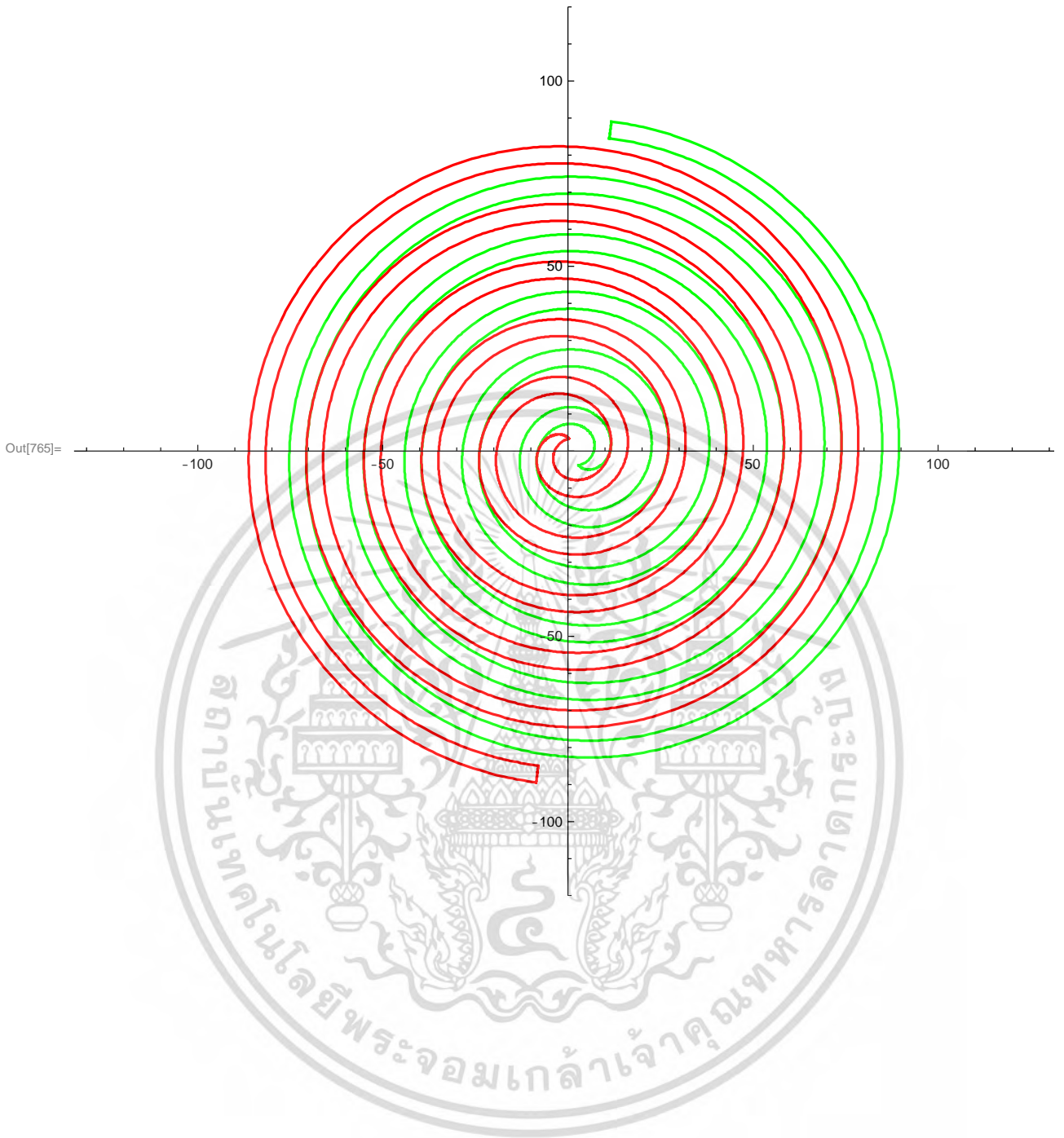
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



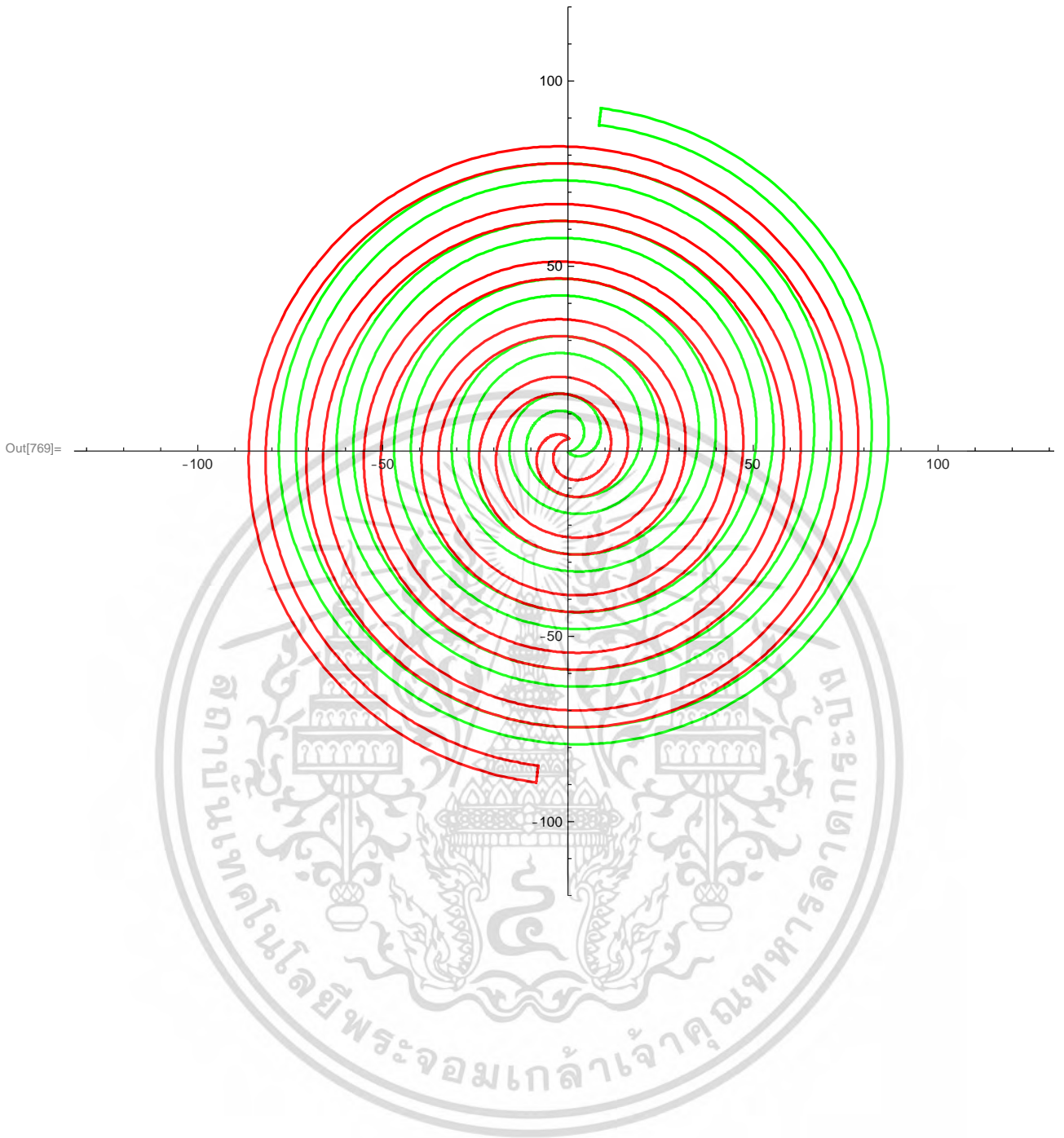
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Appendix C.

The Data Table of a Scroll Wrap Program

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ln[1]= (* New_Profile_Table_Data *)
(* Kritsada Lowrungsi 56601145 *)

(*Optimum Design of Scroll Expander for the Maximun Power Generator*)
(*The profiles of the scroll with discretional initial angles*)

ClearAll[ts, rb,  $\phi_{ie}$ ,  $\phi_{ie}$ ,  $\phi_{i0}$ ,  $\phi_{o0}$ , tor, ro, Roe,  $\alpha_i$ ,  $\alpha_o$ , a,  $\phi_{is}$ , xos, yos, xis, yis,
xcircle0, ycircle0,  $\phi_{os}$ , R1, R2, dR, Ravg, pcircle0, xoe, yoe, xie, yie,  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,
m, xmove12, ymove12, xmove11, ymove11, xmove22, ymove22, xmove21, ymove21,
xmove32, ymove32, xmove31, ymove31, xmove42, ymove42, xmove41, ymove41]

(*Parameter 1*)
(*Primary Parameter*)
ts = 4.56;
rb = 2.47555;
 $\phi_{ie}$  = 34.4345; (* $\phi_{ie}$ =Objective function in optimization process,
We will use the fixed difference,
 $\phi_o - \phi_{o0} = \phi_i - \phi_{i0}$  or  $\phi_i = \phi_o + \alpha_i$ ;  $\alpha_i = 0$  in the plot calculation*)

(*Secondary Parameter*)
 $\phi_{oe}$  =  $\phi_{ie}$ ; (*For the same ending as  $\phi_{ie}$  and in the calculation,
we will use  $\phi_o$  for the main variable*)

 $\phi_{i0}$  = 0; (* $\phi_{i0} = 0$  but exception for this case*)
 $\phi_{o0}$  = -ts / rb; (* $\phi_{o0} = (-ts / rb)$  ;  $(ts / rb) = (\alpha_i - \alpha_o) = (\phi_{i0} - \phi_{o0})$ *)

tor = ts / rb;
ro = rb *  $\pi$  - ts; (* $ro = (rb * \pi - ts)$ *)
Roe = rb + rb *  $\phi_{ie}$  + ts / 2;

 $\alpha_i$  =  $\phi_{i0}$ ;
 $\alpha_o$  =  $\phi_{o0}$ ;
a = rb;

 $\phi_{is}$  =  $\pi - (\alpha_i - \alpha_o) / 2$ ; (* $\phi_{is} = \text{approx} \dots (\pi - (\alpha_i - \alpha_o) / 2)$ *)

(*For outer involute,*)
(* $\phi_{os} < \phi_o < \phi_{oe}$  ;*)
(* $x_o = a * (\cos(\phi_o + \alpha_o) + \phi_o * \sin(\phi_o + \alpha_o))$  ;*)
(* $y_o = a * (\sin(\phi_o + \alpha_o) - \phi_o * \cos(\phi_o + \alpha_o))$  ;*)

(*For inner involute,*)
(* $\phi_{is} < \phi_i < \phi_{ie}$  ;*)
(* $x_i = a * (\cos(\phi_i + \alpha_i) + \phi_i * \sin(\phi_i + \alpha_i))$  ;*)
(* $y_i = a * (\sin(\phi_i + \alpha_i) - \phi_i * \cos(\phi_i + \alpha_i))$  ;*)

(*Parameter 2*)
xos = a * (Cos[ $\phi_{os}$  +  $\alpha_o$ ] +  $\phi_{os}$  * Sin[ $\phi_{os}$  +  $\alpha_o$ ]);
yos = a * (Sin[ $\phi_{os}$  +  $\alpha_o$ ] -  $\phi_{os}$  * Cos[ $\phi_{os}$  +  $\alpha_o$ ]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

xis = a * (Cos[phi_s + ai] + phi_s * Sin[phi_s + ai]);
yis = a * (Sin[phi_s + ai] - phi_s * Cos[phi_s + ai]);

xcircle0 = a * Cos[pi + (ai + ao) / 2];
ycircle0 = a * Sin[pi + (ai + ao) / 2];

Clear[phi_s]

FindRoot[{(xis - xcicle0)^2 + (yis - ycicle0)^2 ==
  ((a * (Cos[phi_s + ao] + phi_s * Sin[phi_s + ao])) - xcicle0)^2 +
  ((a * (Sin[phi_s + ao] - phi_s * Cos[phi_s + ao])) - ycicle0)^2},
{phi_s, 1}, PrecisionGoal -> 4]

phi_s = 0.9432;
(*From the trial and error to have R2=R1 in the interaction arc*)

R1 = Sqrt[(xis - xcicle0)^2 + (yis - ycicle0)^2];
R2 = Sqrt[(xos - xcicle0)^2 + (yos - ycicle0)^2];
dR = R1 - R2;
(*Check R2 must equalto R1. If not adjust phi_s and re-calculation*)
Ravg = (R1 + R2) / 2;

(*"Cartesian" -> "Polar", {xcicle0, ycicle0} = {Rcicle0, theta_cicle0} *)
pcircle0 = CoordinateTransformData[
  {"Cartesian" -> "Polar"}, "Mapping", {xcicle0, ycicle0}];

(*Parameter 3*)
xoe = a * (Cos[phi_oe] + (phi_oe - phi_o0) * Sin[phi_oe]);
yoe = a * (Sin[phi_oe] - (phi_oe - phi_o0) * Cos[phi_oe]);

xie = a * (Cos[phi_ie] + (phi_ie - phi_i0) * Sin[phi_ie]);
yie = a * (Sin[phi_ie] - (phi_ie - phi_i0) * Cos[phi_ie]);

dx = ro * Cos[phi_ie]; (* Orbit Radius,
ro is the radius which control the orbit of moving scroll. *)
dy = ro * Sin[phi_ie];
(* 2ro = 2pi*rb + 2ts and Cos[gamma] = Cos[phi_ie - 2n*pi] = Cos[phi_ie] *)
m = dy / dx;

(*Parameter 4.1 SW*)
xmove12 = xoe - dx;
ymove12 = yoe - dy;
xmove11 = xie - dx;
ymove11 = yie - dy;

(*Parameter 4.2 NW*)
xmove22 = xoe - dy;
ymove22 = yoe + dx;
xmove21 = xie - dy;
ymove21 = yie + dx;

```

```

(*Parameter 4.3 NE*)
xmove32 = xoe +  $\delta x$ ;
ymove32 = yoe +  $\delta y$ ;
xmove31 = xie +  $\delta x$ ;
ymove31 = yie +  $\delta y$ ;

(*Parameter 4.4 SE*)
xmove42 = xoe +  $\delta y$ ;
ymove42 = yoe -  $\delta x$ ;
xmove41 = xie +  $\delta y$ ;
ymove41 = yie -  $\delta x$ ;

(*Print all parameter*)
Print["ts = ", ts]
Print["rb = ", rb]

Print[" $\phi_{oe}$  = ",  $\phi_{oe}$ ]
Print[" $\phi_{ie}$  = ",  $\phi_{ie}$ ]

Print[" $\phi_{o0}$  = ",  $\phi_{o0}$ ]
Print[" $\phi_{i0}$  = ",  $\phi_{i0}$ ]

Print["tor = ", ts / rb]
Print["ro = ", ro]
Print["Roe = ", Roe]

Print[" $\alpha$  = ",  $\alpha$ ]
Print[" $\alpha_i$  = ",  $\alpha_i$ ]
Print["a = ", a]

Print[" $\phi_{os}$  = ",  $\phi_{os}$ ]
Print[" $\phi_{is}$  = ",  $\phi_{is}$ ]

Print["xos = ", xos]
Print["yos = ", yos]
Print["xis = ", xis]
Print["yis = ", yis]

Print["xcircle0 = ", xcircle0]
Print["ycircle0 = ", ycircle0]

Print["R1 = ", R1]
Print["R2 = ", R2]
Print["dR = ", dR]
Print["Ravg = ", Ravg]

Print["pcircle0 = ", pcircle0]

Print["xoe = ", xoe]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Print["yoe = ", yoe]
Print["xie = ", xie]
Print["yie = ", yie]

Print["δx = ", δx]
Print["δy = ", δy]
Print["m = ", m]

Print["xmove12 = ", xmove12]
Print["ymove12 = ", ymove12]
Print["xmove11 = ", xmove11]
Print["ymove11 = ", ymove11]

Print["xmove22 = ", xmove22]
Print["ymove22 = ", ymove22]
Print["xmove21 = ", xmove21]
Print["ymove21 = ", ymove21]

Print["xmove32 = ", xmove32]
Print["ymove32 = ", ymove32]
Print["xmove31 = ", xmove31]
Print["ymove31 = ", ymove31]

Print["xmove42 = ", xmove42]
Print["ymove42 = ", ymove42]
Print["xmove41 = ", xmove41]
Print["ymove41 = ", ymove41]

```

```
Out[22]= {φos → 0.943201}
```

```

ts = 4.56
rb = 2.47555
φoe = 34.4345
φie = 34.4345
φo0 = -1.84201
φi0 = 0
tor = 1.84201
ro = 3.21717
Roe = 89.9999
αo = -1.84201
αi = 0
a = 2.47555
φos = 0.9432
φis = 2.22059
xos = -0.286175
yos = -3.39093

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

xis = 2.87916
yis = 5.29695
xcircle0 = -1.49775
ycircle0 = 1.97106
R1 = 5.49717
R2 = 5.49717
dR = 2.39572 × 10-6
Ravg = 5.49717
pcircle0 = {2.47555, 2.22059}
xoe = 8.56297
yoe = 89.4294
xie = 8.00342
yie = 84.9039
δx = -3.19286
δy = 0.394776
m = -0.123644
xmove12 = 11.7558
ymove12 = 89.0346
xmove11 = 11.1963
ymove11 = 84.5091
xmove22 = 8.16819
ymove22 = 86.2366
xmove21 = 7.60864
ymove21 = 81.711
xmove32 = 5.37011
ymove32 = 89.8242
xmove31 = 4.81056
ymove31 = 85.2987
xmove42 = 8.95775
ymove42 = 92.6223
xmove41 = 8.39819
ymove41 = 88.0967

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In[100]=

```

(*For interaction arc,*)
(* $\phi_{os} < \phi_n < \phi_{is}$ ;)*)
(* $x_t = R_1 \cos(\phi_t) + x_{circle0}$ ;)*)
(* $y_t = R_1 \sin(\phi_t) + y_{circle0}$ ;)*)
(*Calibrate a little number for the better curve*)

(*Plot all Graph*)

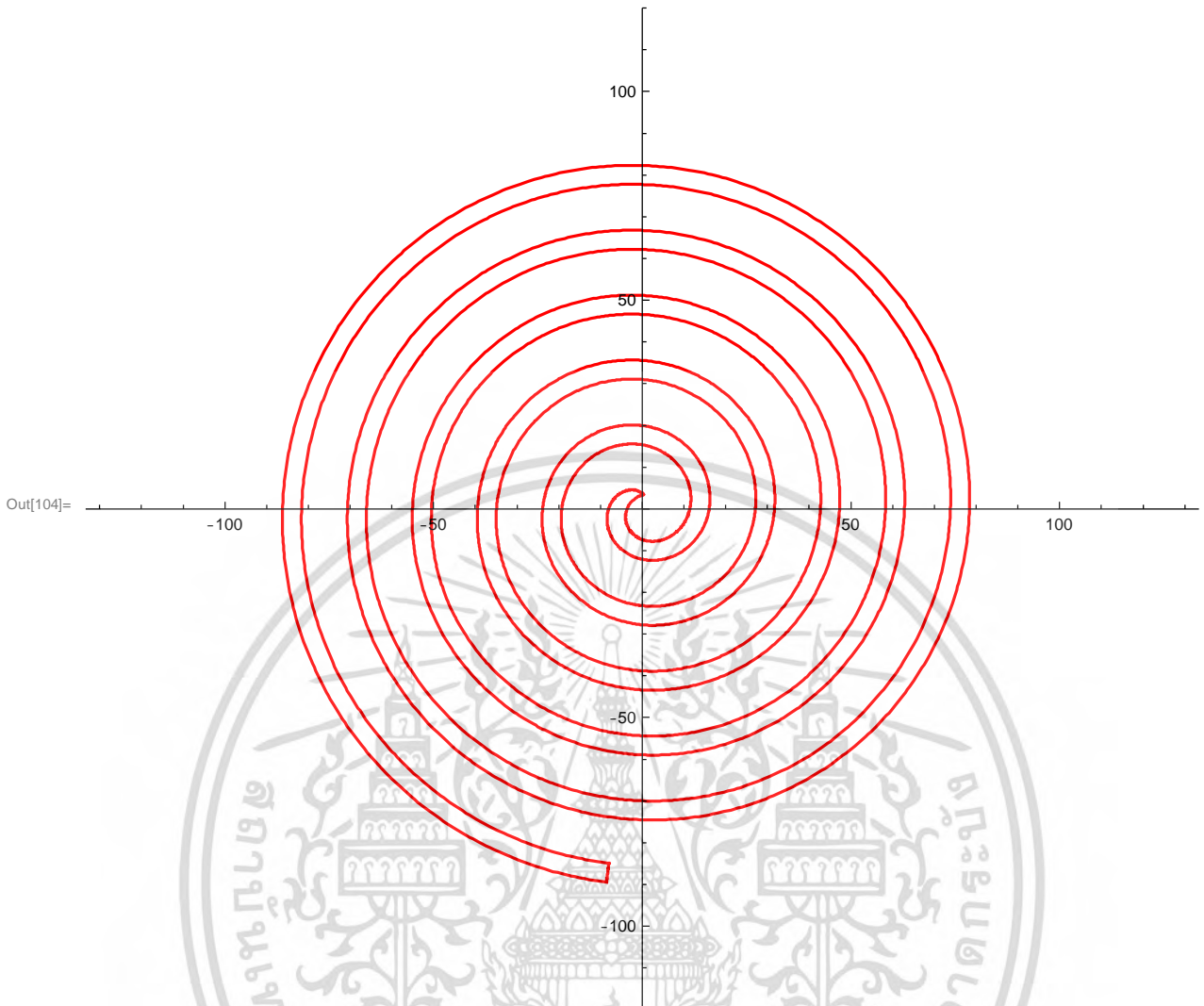
(*CCW Cycle is used for Expander Cycle*)
(*1.NE, 2.NW, 3.SW, 4.SE*)

(*Cycle NE*)
do = ParametricPlot[{-a * (Cos[ $\phi_i + \phi_{o0}$ ] +  $\phi_i$  * Sin[ $\phi_i + \phi_{o0}$ ]),
  -a * (Sin[ $\phi_i + \phi_{o0}$ ] -  $\phi_i$  * Cos[ $\phi_i + \phi_{o0}$ ])}, { $\phi_i$ ,  $\phi_{os}$ ,  $\phi_{ie} + tor$ },
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
di = ParametricPlot[{-a * (Cos[ $\phi_i + \phi_{i0}$ ] +  $\phi_i$  * Sin[ $\phi_i + \phi_{i0}$ ]),
  -a * (Sin[ $\phi_i + \phi_{i0}$ ] -  $\phi_i$  * Cos[ $\phi_i + \phi_{i0}$ ])}, { $\phi_i$ ,  $\phi_{is}$ ,  $\phi_{ie}$ },
  PlotRange → {-120, 120}, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
dt = ParametricPlot[{- (Ravg * Cos[ $\phi_i$ ] +  $x_{circle0}$ ), - (Ravg * Sin[ $\phi_i$ ] +  $y_{circle0}$ )},
  { $\phi_i$ ,  $\phi_{os} - tor * 1.25$ ,  $\phi_{is} + \phi_{i0} - tor / 1.2$ }, PlotRange → {-120, 120},
  PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)
de = ParametricPlot[{-x,
  -(((a * (Sin[( $\phi_{ie} + tor$ ) +  $\phi_{o0}$ ] - ( $\phi_{ie} + tor$ ) * Cos[( $\phi_{ie} + tor$ ) +  $\phi_{o0}$ ])) -
  (a * (Sin[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ] -  $\phi_{ie}$  * Cos[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ])))) /
  ((a * (Cos[( $\phi_{ie} + tor$ ) +  $\phi_{o0}$ ] + ( $\phi_{ie} + tor$ ) * Sin[( $\phi_{ie} + tor$ ) +  $\phi_{o0}$ ])) -
  (a * (Cos[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ] +  $\phi_{ie}$  * Sin[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ])))) *
  (x - (a * (Cos[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ] +  $\phi_{ie}$  * Sin[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ])) +
  (a * (Sin[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ] -  $\phi_{ie}$  * Cos[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ])))),
  {x, a * (Cos[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ] +  $\phi_{ie}$  * Sin[ $\phi_{ie} + \phi_{i0}$ ]),
  a * (Cos[( $\phi_{ie} + tor$ ) +  $\phi_{o0}$ ] + ( $\phi_{ie} + tor$ ) * Sin[( $\phi_{ie} + tor$ ) +  $\phi_{o0}$ ])},
  PlotRange → {-120, 120},
  PlotStyle →
  {RGBColor[1, 0, 0]}; (*...OK*)

Show[do, di, dt, de]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```
In[105]:= (*Table Data*)

Print[" $\phi_{oe}$  = ",  $\phi_{oe}$ ]
Print[" $\phi_{ie}$  = ",  $\phi_{ie}$ ]

Print[" $\phi_{o0}$  = ",  $\phi_{o0}$ ]
Print[" $\phi_{i0}$  = ",  $\phi_{i0}$ ]

Print["tor = ",  $t_s / r_b$ ]
Print["a = ", a]

Print[" $\phi_{os}$  = ",  $\phi_{os}$ ]
Print[" $\phi_{is}$  = ",  $\phi_{is}$ ]

Print[" $\Delta o$  = ",  $\Delta o = 0.005$ ]
Print["no = ",  $no = \text{Round}[(\phi_{ie} + \text{tor}) - \phi_{os}] / \Delta o$ ]

Print[" $\Delta i$  = ",  $\Delta i = 0.005$ ]
Print["ni = ",  $ni = \text{Round}[(\phi_{ie} - \phi_{is}) / \Delta i]$ ]
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Print["Δt = ", Δt = 0.005]
Print["nt = ", nt = Round[((φis + φi0 - tor / 1.2) - (φos - tor * 1.2)) / Δt]]

Print["Δe = ", Δe = 0.005]
Print["ne = ",
  ne = Round[((ro * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0])) -
    (ro * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]))) / Δe]]

dox[φi_] = -a * (Cos[φi + φo0] + φi * Sin[φi + φo0]);
doy[φi_] = -a * (Sin[φi + φo0] - φi * Cos[φi + φo0]);

list = Table[{PaddedForm[φi, {6, 4}], PaddedForm[dox[φi], {8, 5}],
  PaddedForm[doy[φi], {8, 5}]}, {φi, φos, φie + tor, Δo}];
TableForm[list, TableHeadings → {None, {" φo", " dox", " doy"}},
  TableAlignments → Right, TableSpacing → {0, 3}]

dix[φi_] = -a * (Cos[φi + φi0] + φi * Sin[φi + φi0]);
diy[φi_] = -a * (Sin[φi + φi0] - φi * Cos[φi + φi0]);

list = Table[{PaddedForm[φi, {6, 4}], PaddedForm[dix[φi], {8, 5}],
  PaddedForm[doy[φi], {8, 5}]}, {φi, φis, φie, Δi}];
TableForm[list, TableHeadings → {None, {" φi", " dix", " diy"}},
  TableAlignments → Right, TableSpacing → {0, 3}]

dtx[φi_] = -(Ravg * Cos[φi] + xcircle0);
dty[φi_] = -(Ravg * Sin[φi] + ycircle0);

list = Table[{PaddedForm[φi, {6, 4}], PaddedForm[dtx[φi], {8, 5}],
  PaddedForm[dty[φi], {8, 5}]}, {φi, φos - tor * 1.25, φis + φi0 - tor / 1.2, Δt}];
TableForm[list, TableHeadings → {None, {" φt", " dtx", " dty"}},
  TableAlignments → Right, TableSpacing → {0, 3}]

dex[φi_] = -x;
dey[φi_] = -(((a * (Sin[(φie + tor) + φo0] - (φie + tor) * Cos[(φie + tor) + φo0])) -
  (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0]))) /
  ((a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0])) -
  (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]))) *
  (x - (a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]))) +
  (a * (Sin[φie + φi0] - φie * Cos[φie + φi0])));

list = Table[{PaddedForm[x, {6, 4}], PaddedForm[dex[x], {8, 5}],
  PaddedForm[dey[x], {8, 5}]}, {x, a * (Cos[φie + φi0] + φie * Sin[φie + φi0]),
  a * (Cos[(φie + tor) + φo0] + (φie + tor) * Sin[(φie + tor) + φo0]), Δe}];
TableForm[list, TableHeadings → {None, {" x", " dex", " dey"}},
  TableAlignments → Right, TableSpacing → {0, 3}]

```

φoe = 34.4345

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

phi_e = 34.4345
phi_0 = -1.84201
phi_i0 = 0
tor = 1.84201
a = 2.47555
phi_os = 0.9432
phi_is = 2.22059
Delta_o = 0.005
no = 7067
Delta_i = 0.005
ni = 6443
Delta_t = 0.005
nt = 391
Delta_e = 0.005
ne = 145

```

Out[124]/TableForm=

... 1 ...

large output show less show more show all set size limit...

Out[128]/TableForm=

... 1 ...

large output show less show more show all set size limit...

Out[132]/TableForm=

ϕ_t	dtx	dty
-1.3593	0.34387	3.40364
-1.3543	0.31701	3.39780
-1.3493	0.29018	3.39183
-1.3443	0.26338	3.38573
-1.3393	0.23661	3.37949
-1.3343	0.20988	3.37312
-1.3293	0.18317	3.36661
-1.3243	0.15650	3.35997
-1.3193	0.12986	3.35320
-1.3143	0.10326	3.34629
-1.3093	0.07669	3.33925
-1.3043	0.05016	3.33208
-1.2993	0.02366	3.32478
-1.2943	-0.00280	3.31734
-1.2893	-0.02923	3.30977
-1.2843	-0.05561	3.30207
-1.2793	-0.08196	3.29424
-1.2743	-0.10826	3.28627
-1.2693	-0.13453	3.27818
-1.2643	-0.16076	3.26995
-1.2593	-0.18694	3.26159
-1.2543	-0.21308	3.25310

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-1.2493	-0.23918	3.24448
-1.2443	-0.26524	3.23573
-1.2393	-0.29125	3.22685
-1.2343	-0.31722	3.21784
-1.2293	-0.34314	3.20871
-1.2243	-0.36901	3.19944
-1.2193	-0.39484	3.19004
-1.2143	-0.42062	3.18051
-1.2093	-0.44636	3.17085
-1.2043	-0.47204	3.16107
-1.1993	-0.49768	3.15116
-1.1943	-0.52327	3.14111
-1.1893	-0.54880	3.13095
-1.1843	-0.57429	3.12065
-1.1793	-0.59972	3.11023
-1.1743	-0.62510	3.09967
-1.1693	-0.65042	3.08900
-1.1643	-0.67570	3.07819
-1.1593	-0.70092	3.06726
-1.1543	-0.72608	3.05621
-1.1493	-0.75119	3.04502
-1.1443	-0.77624	3.03372
-1.1393	-0.80124	3.02228
-1.1343	-0.82617	3.01073
-1.1293	-0.85105	2.99905
-1.1243	-0.87588	2.98724
-1.1193	-0.90064	2.97531
-1.1143	-0.92534	2.96326
-1.1093	-0.94998	2.95108
-1.1043	-0.97456	2.93878
-1.0993	-0.99908	2.92636
-1.0943	-1.02353	2.91381
-1.0893	-1.04793	2.90114
-1.0843	-1.07226	2.88835
-1.0793	-1.09652	2.87544
-1.0743	-1.12072	2.86241
-1.0693	-1.14486	2.84926
-1.0643	-1.16892	2.83598
-1.0593	-1.19293	2.82259
-1.0543	-1.21686	2.80908
-1.0493	-1.24073	2.79545
-1.0443	-1.26453	2.78169
-1.0393	-1.28825	2.76782
-1.0343	-1.31191	2.75383
-1.0293	-1.33550	2.73973
-1.0243	-1.35902	2.72550
-1.0193	-1.38247	2.71116
-1.0143	-1.40584	2.69670
-1.0093	-1.42915	2.68212
-1.0043	-1.45238	2.66743
-0.9993	-1.47553	2.65262
-0.9943	-1.49861	2.63770
-0.9893	-1.52162	2.62266
-0.9843	-1.54455	2.60750
-0.9793	-1.56740	2.59224
-0.9743	-1.59018	2.57685
-0.9693	-1.61288	2.56136
-0.9643	-1.63551	2.54575
-0.9593	-1.65805	2.53002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-0.9543	-1.68052	2.51419
-0.9493	-1.70290	2.49824
-0.9443	-1.72521	2.48218
-0.9393	-1.74744	2.46601
-0.9343	-1.76958	2.44973
-0.9293	-1.79164	2.43334
-0.9243	-1.81362	2.41684
-0.9193	-1.83552	2.40022
-0.9143	-1.85734	2.38350
-0.9093	-1.87907	2.36667
-0.9043	-1.90071	2.34974
-0.8993	-1.92227	2.33269
-0.8943	-1.94375	2.31554
-0.8893	-1.96514	2.29827
-0.8843	-1.98644	2.28091
-0.8793	-2.00766	2.26343
-0.8743	-2.02879	2.24585
-0.8693	-2.04983	2.22817
-0.8643	-2.07078	2.21038
-0.8593	-2.09164	2.19248
-0.8543	-2.11242	2.17448
-0.8493	-2.13310	2.15638
-0.8443	-2.15369	2.13817
-0.8393	-2.17419	2.11987
-0.8343	-2.19460	2.10146
-0.8293	-2.21492	2.08294
-0.8243	-2.23514	2.06433
-0.8193	-2.25527	2.04561
-0.8143	-2.27531	2.02680
-0.8093	-2.29525	2.00788
-0.8043	-2.31510	1.98887
-0.7993	-2.33485	1.96976
-0.7943	-2.35450	1.95054
-0.7893	-2.37406	1.93123
-0.7843	-2.39353	1.91183
-0.7793	-2.41289	1.89232
-0.7743	-2.43216	1.87272
-0.7693	-2.45133	1.85302
-0.7643	-2.47040	1.83323
-0.7593	-2.48937	1.81334
-0.7543	-2.50824	1.79336
-0.7493	-2.52702	1.77328
-0.7443	-2.54569	1.75311
-0.7393	-2.56426	1.73285
-0.7343	-2.58273	1.71249
-0.7293	-2.60109	1.69204
-0.7243	-2.61936	1.67150
-0.7193	-2.63752	1.65087
-0.7143	-2.65558	1.63015
-0.7093	-2.67353	1.60934
-0.7043	-2.69138	1.58844
-0.6993	-2.70913	1.56745
-0.6943	-2.72677	1.54637
-0.6893	-2.74430	1.52520
-0.6843	-2.76173	1.50395
-0.6793	-2.77905	1.48261
-0.6743	-2.79626	1.46118
-0.6693	-2.81337	1.43967
-0.6643	-2.83037	1.41807

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-0.6593	-2.84726	1.39639
-0.6543	-2.86405	1.37462
-0.6493	-2.88072	1.35277
-0.6443	-2.89728	1.33083
-0.6393	-2.91374	1.30882
-0.6343	-2.93008	1.28672
-0.6293	-2.94632	1.26454
-0.6243	-2.96244	1.24228
-0.6193	-2.97845	1.21994
-0.6143	-2.99435	1.19752
-0.6093	-3.01013	1.17502
-0.6043	-3.02581	1.15244
-0.5993	-3.04137	1.12978
-0.5943	-3.05682	1.10705
-0.5893	-3.07215	1.08424
-0.5843	-3.08737	1.06135
-0.5793	-3.10247	1.03838
-0.5743	-3.11746	1.01535
-0.5693	-3.13234	0.99223
-0.5643	-3.14710	0.96905
-0.5593	-3.16174	0.94578
-0.5543	-3.17627	0.92245
-0.5493	-3.19067	0.89904
-0.5443	-3.20497	0.87557
-0.5393	-3.21914	0.85202
-0.5343	-3.23320	0.82840
-0.5293	-3.24714	0.80471
-0.5243	-3.26095	0.78095
-0.5193	-3.27466	0.75712
-0.5143	-3.28824	0.73323
-0.5093	-3.30170	0.70926
-0.5043	-3.31504	0.68523
-0.4993	-3.32826	0.66113
-0.4943	-3.34136	0.63697
-0.4893	-3.35434	0.61274
-0.4843	-3.36720	0.58845
-0.4793	-3.37994	0.56409
-0.4743	-3.39255	0.53967
-0.4693	-3.40504	0.51519
-0.4643	-3.41741	0.49065
-0.4593	-3.42966	0.46604
-0.4543	-3.44178	0.44137
-0.4493	-3.45378	0.41664
-0.4443	-3.46566	0.39186
-0.4393	-3.47741	0.36701
-0.4343	-3.48904	0.34211
-0.4293	-3.50055	0.31714
-0.4243	-3.51192	0.29212
-0.4193	-3.52318	0.26705
-0.4143	-3.53430	0.24191
-0.4093	-3.54531	0.21673
-0.4043	-3.55618	0.19148
-0.3993	-3.56693	0.16619
-0.3943	-3.57755	0.14084
-0.3893	-3.58805	0.11543
-0.3843	-3.59842	0.08998
-0.3793	-3.60866	0.06447
-0.3743	-3.61877	0.03891
-0.3693	-3.62876	0.01331

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-0.3643	-3.63862	-0.01235
-0.3593	-3.64835	-0.03806
-0.3543	-3.65795	-0.06381
-0.3493	-3.66742	-0.08961
-0.3443	-3.67676	-0.11546
-0.3393	-3.68598	-0.14136
-0.3343	-3.69506	-0.16730
-0.3293	-3.70401	-0.19329
-0.3243	-3.71284	-0.21932
-0.3193	-3.72153	-0.24539
-0.3143	-3.73009	-0.27151
-0.3093	-3.73853	-0.29767
-0.3043	-3.74683	-0.32387
-0.2993	-3.75500	-0.35012
-0.2943	-3.76304	-0.37640
-0.2893	-3.77094	-0.40272
-0.2843	-3.77872	-0.42909
-0.2793	-3.78636	-0.45549
-0.2743	-3.79388	-0.48193
-0.2693	-3.80126	-0.50840
-0.2643	-3.80850	-0.53492
-0.2593	-3.81562	-0.56147
-0.2543	-3.82260	-0.58805
-0.2493	-3.82945	-0.61467
-0.2443	-3.83616	-0.64132
-0.2393	-3.84274	-0.66801
-0.2343	-3.84919	-0.69473
-0.2293	-3.85551	-0.72148
-0.2243	-3.86169	-0.74826
-0.2193	-3.86774	-0.77507
-0.2143	-3.87365	-0.80191
-0.2093	-3.87943	-0.82879
-0.2043	-3.88507	-0.85569
-0.1993	-3.89058	-0.88261
-0.1943	-3.89596	-0.90957
-0.1893	-3.90120	-0.93655
-0.1843	-3.90630	-0.96356
-0.1793	-3.91127	-0.99059
-0.1743	-3.91611	-1.01765
-0.1693	-3.92080	-1.04473
-0.1643	-3.92537	-1.07183
-0.1593	-3.92980	-1.09896
-0.1543	-3.93409	-1.12611
-0.1493	-3.93825	-1.15328
-0.1443	-3.94227	-1.18047
-0.1393	-3.94615	-1.20768
-0.1343	-3.94990	-1.23491
-0.1293	-3.95351	-1.26215
-0.1243	-3.95699	-1.28942
-0.1193	-3.96033	-1.31670
-0.1143	-3.96353	-1.34400
-0.1093	-3.96660	-1.37131
-0.1043	-3.96953	-1.39864
-0.0993	-3.97233	-1.42599
-0.0943	-3.97498	-1.45334
-0.0893	-3.97750	-1.48071
-0.0843	-3.97989	-1.50810
-0.0793	-3.98213	-1.53549
-0.0743	-3.98424	-1.56290

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-0.0693	-3.98621	-1.59031
-0.0643	-3.98805	-1.61773
-0.0593	-3.98975	-1.64517
-0.0543	-3.99131	-1.67261
-0.0493	-3.99273	-1.70006
-0.0443	-3.99402	-1.72751
-0.0393	-3.99517	-1.75498
-0.0343	-3.99618	-1.78244
-0.0293	-3.99705	-1.80992
-0.0243	-3.99779	-1.83739
-0.0193	-3.99839	-1.86487
-0.0143	-3.99885	-1.89235
-0.0093	-3.99918	-1.91984
-0.0043	-3.99936	-1.94732
0.0007	-3.99941	-1.97481
0.0057	-3.99933	-2.00229
0.0107	-3.99910	-2.02978
0.0157	-3.99874	-2.05726
0.0207	-3.99824	-2.08474
0.0257	-3.99760	-2.11222
0.0307	-3.99683	-2.13970
0.0357	-3.99592	-2.16717
0.0407	-3.99487	-2.19463
0.0457	-3.99368	-2.22209
0.0507	-3.99236	-2.24955
0.0557	-3.99090	-2.27699
0.0607	-3.98930	-2.30443
0.0657	-3.98756	-2.33186
0.0707	-3.98569	-2.35929
0.0757	-3.98368	-2.38670
0.0807	-3.98153	-2.41410
0.0857	-3.97925	-2.44149
0.0907	-3.97683	-2.46887
0.0957	-3.97427	-2.49624
0.1007	-3.97158	-2.52359
0.1057	-3.96875	-2.55093
0.1107	-3.96578	-2.57825
0.1157	-3.96267	-2.60556
0.1207	-3.95943	-2.63286
0.1257	-3.95606	-2.66014
0.1307	-3.95254	-2.68740
0.1357	-3.94889	-2.71464
0.1407	-3.94511	-2.74186
0.1457	-3.94119	-2.76907
0.1507	-3.93713	-2.79625
0.1557	-3.93293	-2.82342
0.1607	-3.92860	-2.85056
0.1657	-3.92414	-2.87768
0.1707	-3.91954	-2.90478
0.1757	-3.91480	-2.93185
0.1807	-3.90993	-2.95890
0.1857	-3.90492	-2.98593
0.1907	-3.89978	-3.01293
0.1957	-3.89450	-3.03990
0.2007	-3.88909	-3.06685
0.2057	-3.88355	-3.09377
0.2107	-3.87787	-3.12066
0.2157	-3.87205	-3.14753
0.2207	-3.86610	-3.17436



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.2257	-3.86002	-3.20117
0.2307	-3.85380	-3.22794
0.2357	-3.84745	-3.25468
0.2407	-3.84096	-3.28139
0.2457	-3.83435	-3.30807
0.2507	-3.82759	-3.33471
0.2557	-3.82071	-3.36132
0.2607	-3.81369	-3.38790
0.2657	-3.80654	-3.41444
0.2707	-3.79926	-3.44094
0.2757	-3.79184	-3.46741
0.2807	-3.78429	-3.49383
0.2857	-3.77661	-3.52023
0.2907	-3.76880	-3.54658
0.2957	-3.76086	-3.57289
0.3007	-3.75278	-3.59916
0.3057	-3.74458	-3.62540
0.3107	-3.73624	-3.65159
0.3157	-3.72777	-3.67774
0.3207	-3.71917	-3.70384
0.3257	-3.71045	-3.72990
0.3307	-3.70159	-3.75592
0.3357	-3.69260	-3.78190
0.3407	-3.68348	-3.80783
0.3457	-3.67423	-3.83371
0.3507	-3.66485	-3.85955
0.3557	-3.65534	-3.88534
0.3607	-3.64571	-3.91108
0.3657	-3.63594	-3.93677
0.3707	-3.62605	-3.96241
0.3757	-3.61603	-3.98801
0.3807	-3.60588	-4.01355
0.3857	-3.59561	-4.03904
0.3907	-3.58520	-4.06449
0.3957	-3.57467	-4.08987
0.4007	-3.56401	-4.11521
0.4057	-3.55323	-4.14049
0.4107	-3.54232	-4.16572
0.4157	-3.53128	-4.19089
0.4207	-3.52012	-4.21601
0.4257	-3.50883	-4.24107
0.4307	-3.49742	-4.26607
0.4357	-3.48588	-4.29102
0.4407	-3.47422	-4.31591
0.4457	-3.46244	-4.34074
0.4507	-3.45053	-4.36551
0.4557	-3.43849	-4.39022
0.4607	-3.42633	-4.41487
0.4657	-3.41405	-4.43946
0.4707	-3.40165	-4.46399
0.4757	-3.38912	-4.48846
0.4807	-3.37648	-4.51286
0.4857	-3.36371	-4.53720
0.4907	-3.35082	-4.56148
0.4957	-3.33780	-4.58569
0.5007	-3.32467	-4.60983
0.5057	-3.31142	-4.63391
0.5107	-3.29804	-4.65792
0.5157	-3.28455	-4.68187

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.5207	-3.27093	-4.70575
0.5257	-3.25720	-4.72955
0.5307	-3.24335	-4.75329
0.5357	-3.22938	-4.77697
0.5407	-3.21529	-4.80057
0.5457	-3.20108	-4.82410
0.5507	-3.18676	-4.84755
0.5557	-3.17232	-4.87094
0.5607	-3.15776	-4.89425
0.5657	-3.14309	-4.91750
0.5707	-3.12830	-4.94066
0.5757	-3.11339	-4.96376
0.5807	-3.09837	-4.98677
0.5857	-3.08323	-5.00972
0.5907	-3.06798	-5.03258
0.5957	-3.05262	-5.05537
0.6007	-3.03714	-5.07809
0.6057	-3.02155	-5.10072
0.6107	-3.00584	-5.12328
0.6157	-2.99003	-5.14576
0.6207	-2.97410	-5.16816
0.6257	-2.95806	-5.19048
0.6307	-2.94190	-5.21272
0.6357	-2.92564	-5.23487
0.6407	-2.90926	-5.25695
0.6457	-2.89278	-5.27894
0.6507	-2.87619	-5.30085
0.6557	-2.85948	-5.32268
0.6607	-2.84267	-5.34443
0.6657	-2.82575	-5.36609
0.6707	-2.80872	-5.38766
0.6757	-2.79158	-5.40915
0.6807	-2.77434	-5.43055

Out[136]/TableForm=

x	dex	dex
8.0034	-8.00342	-84.90388
8.0084	-8.00842	-84.94432
8.0134	-8.01342	-84.98476
8.0184	-8.01842	-85.02520
8.0234	-8.02342	-85.06564
8.0284	-8.02842	-85.10607
8.0334	-8.03342	-85.14651
8.0384	-8.03842	-85.18695
8.0434	-8.04342	-85.22739
8.0484	-8.04842	-85.26783
8.0534	-8.05342	-85.30827
8.0584	-8.05842	-85.34871
8.0634	-8.06342	-85.38915
8.0684	-8.06842	-85.42958
8.0734	-8.07342	-85.47002
8.0784	-8.07842	-85.51046
8.0834	-8.08342	-85.55090
8.0884	-8.08842	-85.59134
8.0934	-8.09342	-85.63178
8.0984	-8.09842	-85.67222
8.1034	-8.10342	-85.71266
8.1084	-8.10842	-85.75310
8.1134	-8.11342	-85.79353

เอกสาร 8.1184 สารที่ 8.11842 วิชาการ 85.83397 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1234	-8.12342	-85.87441
8.1284	-8.12842	-85.91485
8.1334	-8.13342	-85.95529
8.1384	-8.13842	-85.99573
8.1434	-8.14342	-86.03617
8.1484	-8.14842	-86.07661
8.1534	-8.15342	-86.11705
8.1584	-8.15842	-86.15748
8.1634	-8.16342	-86.19792
8.1684	-8.16842	-86.23836
8.1734	-8.17342	-86.27880
8.1784	-8.17842	-86.31924
8.1834	-8.18342	-86.35968
8.1884	-8.18842	-86.40012
8.1934	-8.19342	-86.44056
8.1984	-8.19842	-86.48099
8.2034	-8.20342	-86.52143
8.2084	-8.20842	-86.56187
8.2134	-8.21342	-86.60231
8.2184	-8.21842	-86.64275
8.2234	-8.22342	-86.68319
8.2284	-8.22842	-86.72363
8.2334	-8.23342	-86.76407
8.2384	-8.23842	-86.80451
8.2434	-8.24342	-86.84494
8.2484	-8.24842	-86.88538
8.2534	-8.25342	-86.92582
8.2584	-8.25842	-86.96626
8.2634	-8.26342	-87.00670
8.2684	-8.26842	-87.04714
8.2734	-8.27342	-87.08758
8.2784	-8.27842	-87.12802
8.2834	-8.28342	-87.16845
8.2884	-8.28842	-87.20889
8.2934	-8.29342	-87.24933
8.2984	-8.29842	-87.28977
8.3034	-8.30342	-87.33021
8.3084	-8.30842	-87.37065
8.3134	-8.31342	-87.41109
8.3184	-8.31842	-87.45153
8.3234	-8.32342	-87.49197
8.3284	-8.32842	-87.53240
8.3334	-8.33342	-87.57284
8.3384	-8.33842	-87.61328
8.3434	-8.34342	-87.65372
8.3484	-8.34842	-87.69416
8.3534	-8.35342	-87.73460
8.3584	-8.35842	-87.77504
8.3634	-8.36342	-87.81548
8.3684	-8.36842	-87.85591
8.3734	-8.37342	-87.89635
8.3784	-8.37842	-87.93679
8.3834	-8.38342	-87.97723
8.3884	-8.38842	-88.01767
8.3934	-8.39342	-88.05811
8.3984	-8.39842	-88.09855
8.4034	-8.40342	-88.13899
8.4084	-8.40842	-88.17943
8.4134	-8.41342	-88.21986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4184	-8.41842	-88.26030
8.4234	-8.42342	-88.30074
8.4284	-8.42842	-88.34118
8.4334	-8.43342	-88.38162
8.4384	-8.43842	-88.42206
8.4434	-8.44342	-88.46250
8.4484	-8.44842	-88.50294
8.4534	-8.45342	-88.54337
8.4584	-8.45842	-88.58381
8.4634	-8.46342	-88.62425
8.4684	-8.46842	-88.66469
8.4734	-8.47342	-88.70513
8.4784	-8.47842	-88.74557
8.4834	-8.48342	-88.78601
8.4884	-8.48842	-88.82645
8.4934	-8.49342	-88.86689
8.4984	-8.49842	-88.90732
8.5034	-8.50342	-88.94776
8.5084	-8.50842	-88.98820
8.5134	-8.51342	-89.02864
8.5184	-8.51842	-89.06908
8.5234	-8.52342	-89.10952
8.5284	-8.52842	-89.14996
8.5334	-8.53342	-89.19040
8.5384	-8.53842	-89.23083
8.5434	-8.54342	-89.27127
8.5484	-8.54842	-89.31171
8.5534	-8.55342	-89.35215
8.5584	-8.55842	-89.39259

In[137]:=

(*The end point of line de is the same as curve do*)

In[138]:= $-a * (\text{Cos}[(\phi_{ie} + \text{tor}) + \phi_{o0}] + (\phi_{ie} + \text{tor}) * \text{Sin}[(\phi_{ie} + \text{tor}) + \phi_{o0}])$

Out[138]= -8.56297

In[139]:= $-a * (\text{Sin}[(\phi_{ie} + \text{tor}) + \phi_{o0}] - (\phi_{ie} + \text{tor}) * \text{Cos}[(\phi_{ie} + \text{tor}) + \phi_{o0}])$

Out[139]= -89.4294

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Appendix D.

Publication

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Call For Papers



TSME-ICoME 2016

The 7th Thai Society of Mechanical Engineers
International Conference on Mechanical Engineering

13-16 December 2016

CHIANG MAI, THAILAND

Important Dates

Abstract Deadline:

31 May 2016

Full manuscript submission deadline:

31 August 2016

Latest New Results Deadline (Poster Session):

30 September 2016

Early-bird registration deadline:

31 October 2016

Conference date:

13-16 December 2016

Honorary Chair

Chinda Charoenphonphanich
Thai Society of Mechanical Engineers
(TSME) President

General Conference Chair

Witaya Wannasuphprasit
Chulalongkorn University, THAILAND

General Conference Vice Chair

Phongsae Pitakwatchara
Chulalongkorn University, THAILAND

General Conference Secretariat

Nopdanai Ajavakom
Chulalongkorn University, THAILAND

Topics

Alternative Energy and Combustion (AEC)
Automotive Aerospace and Marine Engineering (AME)
Applied Mechanics, Materials and Manufacturing (AMM)
Biomechanics and Bioengineering (BME)
Computation and Simulation Techniques (CST)
Dynamics systems, Robotics and Control (DRC)
Engineering Education (EDU)
Energy Technology and Management (ETM)
Industrial Entrepreneurship (IEI)
Micro system and Nanotechnology (MSN)
Thermal System and Fluid Mechanics (TSF)

Selected papers will be invited to submit a full manuscript for publication consideration in **Engineering Journal** (indexed by Scopus) and **Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering** (JRAME).

www.icome2016.org

Secretariat for TSME-ICoME 2016
Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University
Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok, THAILAND 10330
Tel: +66-84-754-9493
Fax: +66-2-252-2889
Email: admin@icome2016.org



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Certificate of Participation


Title “Optimum Design of Scroll Expander Wrap for Organic Rankine Cycle (ORC) Power Generation ”

presented by

Kritsada Lowrungsi and Monsak Pimsarn

The 7th Thai Society of Mechanical Engineers
International Conference of Mechanical Engineering
13-16 December 2016, Chiang Mai, Thailand




Chinda Charoenphonphanich
Honorary Chair
Thai Society of Mechanical Engineers (TSME) President




Wittaya Wannasuphoprasit
General Conference Chair
Chulalongkorn University

Optimum Design of Scroll Expander Wrap for Organic Rankine Cycle (ORC) Power Generation

Kritsada Lowrunsi^{1,*} and Monsak Pimsarn²

^{1,2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

* Corresponding Author: E-mail: krits.low@gmail.com, Telephone Number 0894414169

Abstract

The Organic Rankine Cycle (ORC) is an emerging technology for power generation through heat recovering from different thermal sources. In the 1-10 kW ORC power generation, it is difficult to find the suitable equipment to expand the gas, reduce pressure and converse heat to be mechanical energy. Considering from thermodynamics and mechanics principle, it is obviously found that the scroll mechanism is the most suitable for kW scale power generation. The reason for this is that it can operate without the high mass flow rate condition. This paper presents an optimization design of scroll expander wrap to assess the maximum isentropic power generation (brake horse power) from the expansion ratio (discharge volume / suction volume). Using fixed thickness scroll formulas from the previous work, in this design study, the base radius and inner ending involute angle were chosen to be design variables and the gradient-based methods and the direct search methods were utilized to search for the maximum expansion ratio. Additionally, some of constraints such as scroll wrap radius within 90 mm to be set in frame diameter 250 mm, within slenderness ratio of scroll height and over the minimum scroll height / base radius ratio were also included in the design. The design result exhibits that expansion ratio is 5.7155 which is better than the standard scroll expander, 3.9061. Therefore, this leads to 44.3% improvement of expansion ratio. The results of this work can be considered as the first process of ORC system design to maximize performance of expander machine within the desired dimension, the built in volumetric ratio need to be corresponding.

Keywords: Scroll, Expander, Organic Rankine Cycle, ORC, Power

1. Introduction

The low grade waste heat recovery (temperature lower than 200 °C) from cold and hot cycle for power generation is one of the system efficiency improvements. Various technologies had been introduced with this waste heat but the result was not satisfied. Even though the new emerging technology for this waste heat level has been invented, one of the technology so-called Organic Rankine Cycle (ORC) is the Rankine cycle which use organic fluid instead of ordinary water to be convective heat transfer media in the system. This can be the most popular alternative. The organic substance which has been chosen is our well known fluid, refrigerant, in regard to required temperature and phase. R245fa is the most preferable because the narrow phase transition energy and suitable temperature level.

In this cycle, electric generators will be driven by a prime mover. Expansion machines have been used in this function which can be classified in 2 types, turbo machines and positive displacement expanders for the high and low gas flow rate accordingly.

The aim of the present paper is to determine the positive displacement mechanism, scroll expander which is suitable for the low mass flow rate (lower than 1 kg/s) for low grade waste heat recovery. These

mass flow rate and temperature can be applied with the waste heat of factory and building by using the concept of optimum design to choose the suitable dimensions of scroll expander for the maximum power generation from expansion ratio (volume ratio). By setting up the assumption of expansion ratio varied to the number of involute cycle, this leads to establish the key variable to be inner ending angle, ϕ_{ie} and base circle radius, r_b .

2. Development of Scroll Wrap

Scroll theory has been invented by Leon Creux on 1905 [1]. But it was impossible to produce a working pair of scrolls until the middle 1970's due to a very small tolerance required [2]. After that, the scroll compressor become more and more popular because of its unique advantages, low level of noise, high efficiency and high reliability.

The geometry of scroll compressor is one of the main factors affecting the efficiency of the compressor. The geometry of the scroll has to be completely understood in order to establish a thermodynamic model.

The wraps of scrolls directly affect the built-in compression ratio and the performance of the compressor. Many researchers have done a lot of

ICOME2016-0042

work in this field which emphasis on the inner portion because the outer portion of the scroll wraps is the involute and simple. Furthermore, many following papers described the development of geometrical scroll model from this basis until Baolong Wang [2] was develop the scroll wrap model which have thickness variable inside.

At this stage, the new formula of working chamber volume has been developed based on discretional initial angles of involute. And the expression of the volume during all the suction, compression and discharge processes in a general subsection function are disclosure too.

After that, the paper “Derivation of Optimal Scroll Compressor Wrap for Minimization of Leakage Losses” by Ian H. Bell [3] uses this concept to develop volume ratio by substitute depth and inner ending angle in this ratio. By using fixed displacement volume (suction volume of scroll compressor or exhaust volume of scroll expander), set up radial loss and leakage loss have the formula belonged to inner ending angle then calculate the minimum total loss by Phyton software.

3. Geometric Parameters

3.1 Scroll Wrap Definition

The scroll expander geometry is formed of involutes of a circle. Details of these geometric parameters are beyond the scope of this paper, nevertheless the full derivations are presented by Baolong Wang [2]. The involute of a circle is the line that would be formed if unwrap a circle with radius r_b . The coordinates of a point on the involute are presented in Ian H. Bell [3] as the follow:

$$\begin{aligned} x &= r_b(\cos \varphi + (\varphi - \varphi_0) \sin \varphi) \\ y &= r_b(\sin \varphi - (\varphi - \varphi_0) \cos \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

The thickness of the scroll wrap can be written by:

$$t_s = r_b(\varphi_{i0} - \varphi_{o0}) \quad (2)$$

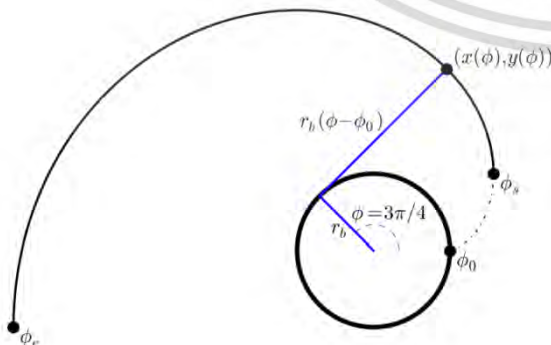


Fig. 1 Basic terminology of scroll involute, reprinted from [3]

The displacement volume, inner chamber volume and volume ratio can be given as the follow:

$$V_{disp} = -2\pi t_s r_b r_o (3\pi - 2\varphi_{ie} + \varphi_{i0} + \varphi_{o0}) \quad (3)$$

$$2V_{c,d} = 2\pi t_s r_b r_o (2\varphi_{os} + 3\pi - \varphi_{i0} - \varphi_{o0}) \quad (4)$$

$$V_{ratio} = \frac{V_{disp}}{2V_{c,d}} = \frac{3\pi - 2\varphi_{ie} + \varphi_{i0} + \varphi_{o0}}{-2\varphi_{os} - 3\pi + \varphi_{i0} + \varphi_{o0}} \quad (5)$$

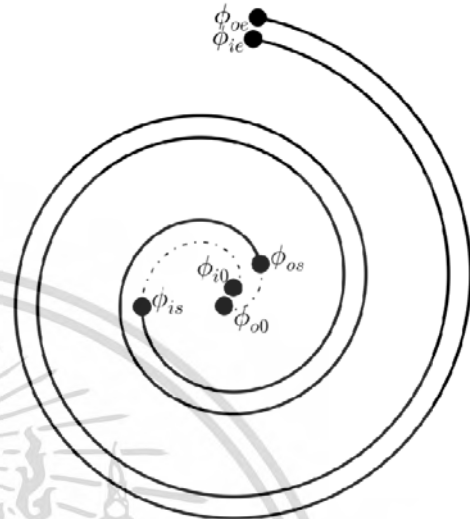


Fig. 2 Derivation of scroll expander wrap, reprinted from [3]

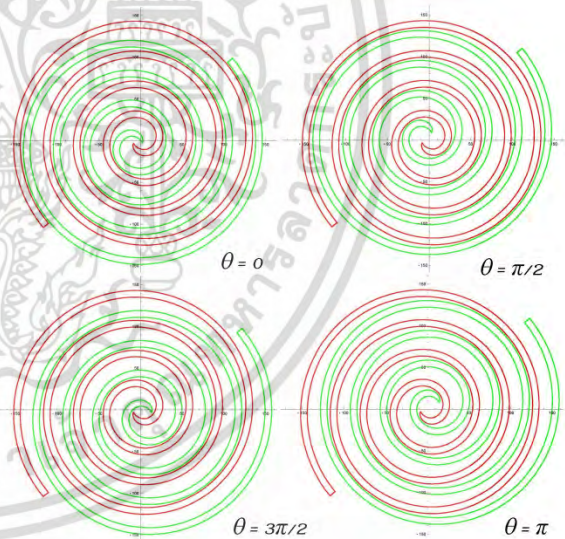


Fig. 3 Cycle of scroll expander wrap

3.2 Derived Terms

In order to calculate displacement volume and volume ratio, some constraints need to be clarified. [3]

The orbiting radius of the orbiting scroll can be given by:

$$r_o = r_b \pi - t_s \quad (6)$$

The outer involute initial angle is given by:

$$\varphi_{o0} = -t_s / r_b \quad (7)$$

The inner involute initial angle, φ_{i0} is set to 0.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICOME2016-0042

The outer starting angle, φ_{os} is equal to $1.57 + \varphi_{o0}$ radians in Vincent Lemort [4] as the follow:

$$\varphi_{os} = 1.57 - t_s / r_b \quad (8)$$

After passed some simplification from (4) - (7), the height of the scroll wrap can be given by:

$$h_s = \frac{V_{disp}}{2\pi r_b^2 V_{ratio}(\pi + \varphi_{o0})(2\varphi_{os} + 3\pi - \varphi_{i0} - \varphi_{o0})} \quad (9)$$

4. Optimization Methodology

4.1 Mathematical Model

In this point of view, the nonlinear, constrained optimum design problem can be expressed mathematically as follows [5], [6]:

$$\begin{aligned} \text{Find } & X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T & (10) \\ \text{to maximize } & f(X) & (11) \\ \text{subject to } & h_i(X) = 0, \quad i = 1, \dots, m = 1 & (12a) \\ & g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n = 3 & (12b) \\ & x_{k,\min} \leq x_k \leq x_{k,\max} & (12c) \end{aligned}$$

Based on the above discussion, the design variables are defined as the following: base circle radius r_b , inner ending involute angle φ_{ie} , scroll thickness t_s , scroll height h_s .

Fig. 4 shows the implementation process. The scroll thickness and scroll height have been set up to 4.56 mm and 28.65 mm accordingly same as the standard scroll expander of Vincent Lemort [4].

Thus, the two design variables are shown in (13), [7]

$$X = [r_b, \varphi_{ie}]^T \quad (13)$$

4.2 Objective function

The objective function can be expressed as shown in (14) using the design variables from (13).

$$V_{ratio} = f(r_b, \varphi_{ie}) \quad (14)$$

In computation process, (5) - (8) will be used for evaluating to be the objective function.

4.3 Constraint conditions

In this optimal design of scroll expander wrap for organic Rankine cycle, the constraint conditions mainly consist of four aspects,

(h₁): Geometric relationship between h_s & V_{disp}
In computation process, (9) will be used for this constraint.

(g₁): Within allowable scroll radius, $R_{oe} \leq 90$
Scroll Radius, R_{oe} is the maximum radius of scroll orbit. This parameter is can be calculated as the follow:

$$R_{oe} = r_b + r_b \varphi_{ie} + t_s / 2 \quad (15)$$

(g₂): Under limited $h_s \leq 12t_s$
To control the slenderness ratio of scroll height versus scroll thickness for the smooth operation of gas flow and prevent effect of transverse vibration.

(g₃): Acceptable $h_s \geq 2r_b$
To control the ratio of scroll height versus base circle radius for the smooth operation of gas flow.

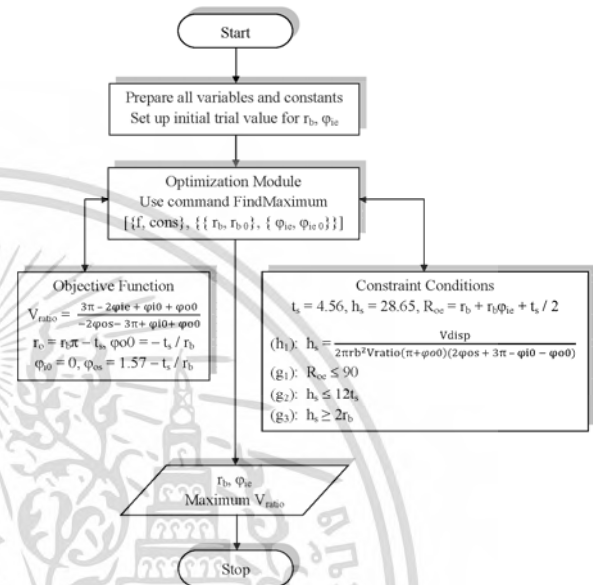


Fig. 4 Work flow of the calculation processes

5. Software Implementation Process

One equality and 3 non-equality constraints are involved in the optimal design of scroll expander wrap for organic Rankine cycle, and this problem is a typical constraint nonlinear programming problem. To solve this type of problems, can be broadly categorized into gradient-based methods and direct search methods. Gradient search methods use first derivatives (gradients) or second derivatives (Hessians) information. Examples are the sequential quadratic programming (SQP) method, the augmented Lagrangian method, and the (nonlinear) interior point method.

Commercial numerical software such as Wolfram Mathematica can support existing optimization algorithms. When the objective function, constraint conditions and the initial values are defined, the optimum design can be preceded by optimization function, FindMaximum (Wolfram command).

FindMaximum used to solve numeric local optimization problem by linear programming methods, nonlinear interior point algorithms and utilize second derivatives. This command continues until either of the goals specified by AccuracyGoal or PrecisionGoal (Wolfram command) is achieved [8].

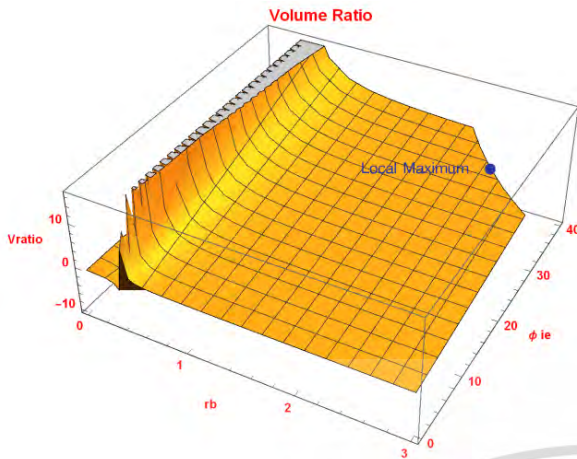


Fig. 5 Isometric perspective of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle

6. Result and discussion

The optimization problem under consideration in this study is to find the optimal values of the design variable, x_i that maximize the volume ratio, V_{ratio} . From the computation process, the result of optimum design compared with standard scroll expander has been shown as in Table. 1 - 3. By fixing scroll thickness and scroll height 4.56 mm and 28.65 mm accordingly, in order to compare with standard scroll expander of Vincent Lemort [4]. That scroll wrap has volume ratio 3.9061 at base circle radius r_b 3.2640 mm, inner ending involute angle ϕ_{ie} 25.8250 radian (4.1102 involute cycle). The maximum volume ratio is 5.7155 (efficiency increase 44.3%) at base circle radius r_b 2.4756 mm, inner ending involute angle ϕ_{ie} 34.4345 radian (5.4804 involute cycle). This optimal point has shown in Fig. 5 - 6 for isometric perspective and contour of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle accordingly. The significant constraints are (h_s): Geometric relationship between h_s & V_{disp} , (9) and (g_1): Within allowable scroll radius, $R_{oe} \leq 90$. Both of these criteria make the local maximum of volume ratio.

The result proof the assumption of expansion ratio varied to the number of involute cycle. But if no geometric relationship between h_s & V_{disp} , the scroll wrap will be impractical design from the incomplete geometrical characteristic.

Table. 1 Size dimension of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model

Size Dimension	t_s [mm]	h_s [mm]	r_o [mm]	r_b [mm]	R_{oe} [mm]
Standard	4.56	28.65	5.6942	3.2640	89.8368
Optimum	4.56	28.65	3.2172	2.4756	89.9999

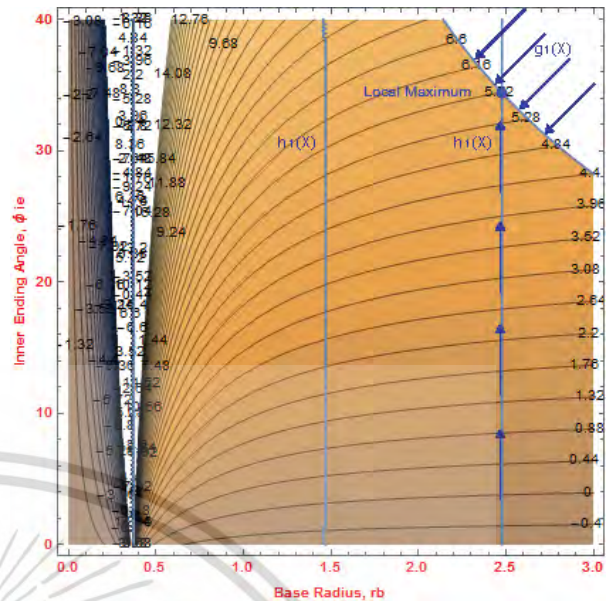


Fig. 6 Contour of volume ratio based on base circle radius and inner ending angle

Table. 2 Angle dimension of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model

Angle Dimension	ϕ_{o0} [rad]	ϕ_{i0} [rad]	ϕ_{os} [rad]	ϕ_{is} [rad]	ϕ_{ie} [rad]
Standard	-1.3971	0	0.1729	2.1029	25.8250
Optimum	-1.8420	0	-0.2720	1.6580	34.4345

Table. 3 Performance of simplified standard scroll expander of Vincent Lemort [4] and optimum design model

Performance	V_{disp} [m ³]	$2V_{g,d}$ [m ³]	V_{ratio}	Eff. [%]	Involute Cycle
Standard	145,946.0	37,363.6	3.9061	100.0	4.1102
Optimum	87,864.9	15,372.9	5.7155	144.3	5.4804

Table. 4 Comparing expansion ratios in the same shape (t_s , h_s and R_{oe}) between current ORC scroll expander research with optimum design model

Size Dimension	t_s [mm]	h_s [mm]	R_{oe} [mm]	r_b [mm]	V_{ratio}
Zhu Wu [9]	5.08	51.55	64.3776	4.0860	1.774
Optimum	5.08	51.55	64.3776	2.1152	4.865
Jen-Chieh Chang [10]	4.00	41.00	56.8956	2.5900	2.950
Optimum	4.00	41.00	56.8956	2.1568	3.859

The current ORC scroll expander research compared with optimum design model has been shown as in Table. 4. The new one has higher expansion ratio (volume ratio) for both papers. Zhu Wu's [9] scroll wrap has volume ratio 1.774, Later, it can be increased to 4.865 and Jen-Chieh Chang's [10] scroll wrap can be changed from 2.950 to be 3.859 as well.

The meaning of higher expansion ratio is that expander can reduce higher pressure. Xinjing Zhang [11] and Sebastien Declaye [12] described pressure ratio analysis in their research. The summary for ORC system is (i) normal expansion, of which the outlet

ICOME2016-0042

pressure is almost close to the system required pressure; (ii) under expansion, of which the discharging pressure is higher than the system required pressure, thus the flow of refrigerant is not smooth from the over pressure; (iii) over expansion, of which the discharging pressure is lower than the system required pressure thus it would cause reverse flow during discharging process. It can be called the pressure ratio corresponding to the built in volumetric ratio of the machine. The under/over expansion losses then occur as illustrated on the P-V diagram presented in Fig. 7.

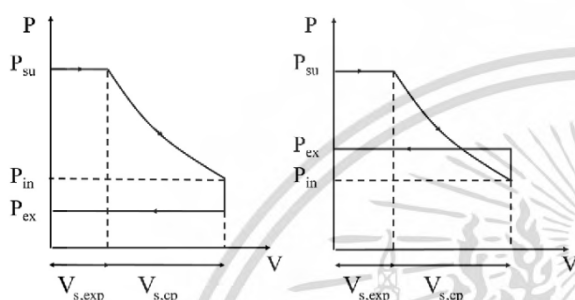


Fig. 7 Under/over expansion losses, reprinted from [12]

Thus, this can be the first process of ORC system design to maximize performance of expander machine within the desired dimension. Then set up the system suction/exhaust pressure of expander from this built in volumetric ratio to be closed to isentropic expansion.

Then use some equations from Zhu Wu [9] and Jen-Chieh Chang [10] to evaluate expander as the following.

The power output of the scroll expander is determined by the conservation equation of energy:

$$\dot{W}_{exp} = \eta_{mec} \dot{m} (h_{exp,in} - h_{exp,out}) \quad (16)$$

In which, $h_{exp,in}$ and $h_{exp,out}$ represent the enthalpy at the inlet and exit of the expander, respectively. The overall mechanical efficiency, η_{mec} is represents the affect from the transmission loss of the pulley and belt, and the mechanical loss of the power generator. Expander efficiency per unit flow rate is defined as:

$$\eta_{exp} = \frac{h_{exp,in} - h_{exp,out}}{h_{exp,in} - h_{exp,out,s}} \quad (17)$$

where, $h_{exp,out,s}$ means the state of fluid, calculated by isentropic expansion process. The volumetric efficiency could be determined the leakage level of a scroll expander. This is defined as the ratio of theoretical mass flow rate and the actual one:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{th}}{\dot{m}_{actual}} \quad (18)$$

The higher expansion ratio results in the higher difference between enthalpy at the inlet and exit of the expander for the higher power output.

7. Conclusion

The optimal values of the design variables of the scroll expander wrap for organic Rankine cycle (ORC) power generation were acquired numerically under the required thickness and height of scroll wrap. Expansion ratio in term of volume ratio and its constraints were analyzed using linear programming methods, nonlinear interior point algorithms and utilize second derivatives by FindMaximum (Wolfram command). The maximum volume ratio is 5.7155 (efficiency increase 44.3%) at base circle radius r_b 2.4756 mm, inner ending involute angle ϕ_{ie} 34.4345 radian (5.4804 involute cycle), while thickness and height were set up to 4.56 mm and 28.65 mm accordingly. Because these 2 variables were relatively similar weight with the chosen 2 variables, to control their dimensions to be matched in Copeland's frame for the next prototype plan.

The comparison with another ORC scroll expander to validate the procedure with the different dimension still shows the higher expansion ratio. This higher expansion ratio leads to the higher difference between enthalpy at the inlet and exit of the expander for the higher power output.

The results of this work can be considered as the first process of ORC system design to maximize performance of expander machine corresponding to the built in volumetric ratio within the desired dimension. It is helpful for the design of scroll expanders wrap and prediction of the whole ORC system performance.

8. Nomenclature

Variables	Subscripts	
A	mm ² Area	0 Initial
F	- Flow correction parameter	s Starting
h_s	mm Scroll height	e Ending
N	- Number of	i0 Inner initial
r_b	mm Base circle radius	is Inner starting
r_o	mm Orbiting Radius	ie Inner ending
t_s	mm Scroll thickness	o0 Outer initial
x	mm x-Coordinate	os Outer starting
y	mm y-Coordinate	oe Outer ending
ϕ^*	rad Effective involute angle	exp Expander
ϕ	rad Involute angle	mec Mechanical
δ	mm Gap width	in Inlet
V_{disp}	mm ³ Displacement Volume	out Outlet
$2V_{c,d}$	mm ³ Inner Chamber Volume	s Isentropic
V_{ratio}	- Volume ratio	th Theoretical
R_{oe}	mm Scroll Radius	V Volumetric
\dot{W}	kW Power	
\dot{m}	kg/s Mass flow rate	
h	kJ/kg Enthalpy	
η	- Efficiency	

ICOME2016-0042

9. References

9.1 Article in Journals

- [2] Baolong Wang, Xianting Li, Wenxing Shi (2005). A general geometrical model of scroll compressors based on discretional initial angles of involute, *International Journal of Refrigeration*, vol.28 (2005), pp. 958–966.
- [5] Kyoungwoo Park, Seungjae Moon (2005). Optimal design of heat exchangers using the progressive quadratic response surface model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.48 (2005), pp. 2126–2139.
- [6] Jiangfeng Wang, Zhequan Yan, Man Wang, Maoqing Li, Yiping Dai (2013). Multi-objective optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using evolutionary algorithm, *Energy Conversion and Management*, vol.71 (2013), pp. 146–158.
- [7] Xueyi Li, Shoubo Jiang and Qingliang Zeng (2013). Optimization of Two-Stage Cylindrical Gear Reducer with Adaptive Boundary Constraints, *Journal of Software*, vol.8, no. 8, August 2013, pp. 2052-2057.
- [9] Zhu Wu, Deng Pan, Naiping Gao, Tong Zhu, Feibo Xie (2015). Experimental testing and numerical simulation of scroll expander in a small scale organic Rankine cycle system, *Applied Thermal Engineering*, vol.87 (2015), pp. 529-537.
- [10] Jen-Chieh Chang, Chao-Wei Chang, Tzu-Chen Hung, Jaw-Ren Lin, Kuo-Chen Huang (2014). Experimental study and CFD approach for scroll type expander used in low-temperature organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, vol.73 (2014), pp. 1444-1452.
- [11] Xinjing Zhang, Yujie Xu, Jian Xu, Yong Sheng, Zhitao Zuo, Jimin Liu, Haisheng Chen, Yaodong Wang, Ye Huang (2016). Study on the performance and optimization of a scroll expander driven by compressed air, *Applied Energy*, xxx (2016) xxx–xxx.
- [12] Sébastien Declaye, Sylvain Quoilin, Ludovic Guillaume, Vincent Lemort (2013). Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) system with R245fa as working fluid, *Energy*, vol.55 (2013), pp. 173-183.

9.2 Proceedings

- [3] Bell, Ian H., Groll, Eckhard A., Braun, James E., and Horton, W. Travis (2012). Derivation of Optimal Scroll Compressor Wrap for Minimization of Leakage Losses, *International Compressor Engineering Conference (2012)*, Paper 2111.
- [4] Vincent Lemort, Sylvain Quoilin, Jean Lebrun (2008). Numerical Simulation of a scroll expander for use in a rankine cycle, *International Compressor Engineering Conference at Purdue*, July 14-17, 2008.

9.3 Patent

- [1] L. Creux (1905). Rotary engine. *US Patent No. 801182*; 1905.

9.4 Software

- [8] *Wolfram Mathematica 10.0* Software (2014).

Author Biography

Author	Kritsada Lowrungsi
Date of Birth	July 30, 1972
Address	153 Soi Chalmphrakiat R.9 soi 48 yak 19, Dokmai, Prawet, Bangkok
Master Degree	Business Administration
Institute	Ramkhamhaeng University
Year of Graduation	2000
Bachelor Degree	Civil Engineering
Institute	Chulalongkorn University
Year of Graduation	1995
Certificate	Pre Mechanical Technique
Institute	King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Year of Graduation	1991
Working Experience	September, 2016 – Present, Chief Advisor at KeyHeat Energy. July, 2012 – August, 2016, Regional Sales Manager at Patton Aero. July, 2009 – June, 2012, Sales & Marketing Manager at Emtec Management. January, 2005 – June, 2009, Sales Director at 304 Industrial Park. May, 1995 - December 2004, Product Manager at ExxonMobil Thailand.
Interested Research	Design and Development of Scroll Expander

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้