แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน สำหรับการประยุกต์ใช้กับการอบแห้งรูป ยางรถยนต์

นาย สุรัตน์ อารีรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-903-5

ลิขสิทธิ์ของ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16759214

HEAT TRANSFER SIMULATION FOR TIRE CURING APPLICATION

MR. SURAT AREERAT

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Chemical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1995

ISBN 974-631-903-5

Thesis Title	Heat Transfer Simulation for Tire Curing Application.
By	Mr. Surat Areerat
Department	Chemical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Ura Pancharoen
Thesis Co. Advisor	Mr. Wiroj Tangcharoen

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirement for the Master's Degree.

Santi Thoongsuwan
---------- Dean of Graduat School
(Associate Professor Santi Thoongsuwan, Ph. D.)

Thesis Committee

Piya Praserthdam
---------- Chairman
(Professor Piyasan Praserthdam, Dr. Ing.)

---------- Thesis advisor
(Associate Professor Ura Pancharoen, D. Eng. Sc.)

---------- Thesis Co. advisor
(Mr. Wiroj Tangcharoen)

Varun Taepaisitphongse
---------- Member
(Varun Taepaisitphongse, Ph. D.)

S. Phatanasri
---------- member
(Suphot Phatanasri, Dr. Eng.)

Copyright of the Graduate school, Chulalongkorn University.

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุรัตน์ อารีรัตน์ : แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสำหรับการประยุกต์ใช้กับการอบคงรูปยางรถยนต์ (HEAT TRANSFER SIMULATION FOR TIRE CURING APPLICATION) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : นายวิโรจน์ ตั้งเจริญ, 96 หน้า. ISBN 974-631-903-5

งานวิจัยฉบับนี้ ได้แสดงถึงวิธีการใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและวิธีการประมาณค่าแบบ Finite difference ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางรถยนต์ ภายใต้ขบวนการอบคงรูป (การวัลคาไนเซชั่น) แบบจำลองที่สร้างขึ้น ถูกนำไปใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งใต้ดอกยาง โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ยางที่ทำการศึกษาคือยางเรเดียลรถบรรทุกขนาดเล็ก ขนาด 195 R 14 C แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้น ให้ผลลัพธ์การคำนวณที่มีความสอดคล้องและสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาได้ เมื่อใช้ค่าฟูเรียร์ เท่ากับ 0.4175 (ค่าฟูเรียร์ เป็นค่าไร้มิติ) สำหรับยางขนาดดังกล่าวในข้างต้น สภาวะขอบเขตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการอบคงรูปขณะอยู่ในแม่พิมพ์ และยางหลังขึ้นรูปแล้วซึ่งอยู่ในลักษณะหล่อเย็น ถูกนำไปใช้เป็นสภาวะขอบเขตในการคำนวณ

ผลการศึกษาทำให้สามารถคำนวณหาค่าการแพร่ความร้อน (ค่าที่ได้จากการทดลอง) สำหรับยางขนาด 195 R 14 C โดยใช้วิธีการประมาณค่าและปรับให้เข้ากับ เส้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่เกิดขึ้นขณะอบคงรูปยางรถยนต์ ค่าการแพร่ความร้อนที่หาได้จากการทดลอง (D-Emp) มีค่าเท่ากับ $9.04 \times 10^{-7} m^2/sec.$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C517294 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: HEAT TRANSFER/ VULCANIZATION/ THERMAL DIFFUSIVITY/ TIRE CURING
SURAT AREERAT : HEAT TRANSFER SIMULATION FOR TIRE CURING APPLICATION.
THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., THESIS
CO-ADVISOR : MR.WIROJ TANGCHAROEN, 96 pp. ISBN 974-631-903-5

This thesis has presented a method of using heat transfer theory and finite difference approximation to build a mathematical model to calculate the temperature changes that occur during the tire curing process (vulcanization). Computer-aided simulation was used to estimate the rise in temperature of under tread position for light truck radial tire size of 195 R 14 C. Using Fourier's number (F_o, dimensionless) equal 0.4175 for this size, the result of the simulation corresponded closely to the theoretical norm. The simulation was based on the dynamic nature of the boundaries within the mould and cooling after moulding finished.

This work made it possible to calculate the value of empirical thermal diffusivity (D-Emp.) for 195 R 14 C, by using the curve fitting of temperature-time profiles for tire curing process. This value (D-Emp.) was 9.04×10^{-7} m^2/sec.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to express his sincere thank to thesis advisor, Associate Professor Dr.Ura Pancharoen, and his thesis coadvisor Mr. Wiroj Tangcharoen, the Technical manager at Siam Tyre Phrapradaeng Co.,Ltd. for their understanding, helpful guidance, grammatical check of this thesis and encouragement in all aspects throughout the period of this work. Thanks are due to the thesis committee, Professor Piyasarn Praserdham, Dr. Varun Taepaisitphongse and Dr. Suphot Phatanasri for their constructive comments.

Siam Tyre Phrapradaeng Co.,Ltd. has provided a lot of useful data for thesis evaluation. Thanks for all people in the company who have contributed to the accomplishment of this work. In addition, the author is grateful to government officials of National Metal and Materials Technology Center (MTEC.), Ministry of Science, Technology and Environment for their permission and kind assistance to use the instruments necessary for this work.

Most of all, the author would like to express his most sincere gratitude to his parents for their understanding and encouragement.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

CONTENTS

	Page
ABSTRACT (in English)	iv
ABSTRACT (in Thai)	v
ACKNOWLEDGEMENT	vi
LIST OF TABLES	x
LIST OF FIGURES	xi
NOMENCLATURE	xiii

CHAPTER	Page
I INTRODUCTION	1
Background	1
Objectives	4
Scope of work	4
Benefits expected	5
II THEORY	
Basic knowledge of tire manufacturing	6
1. Rubber compound forming	7
2. Vulcanization	14
3. Heat transfer	22
Modelling and numerical simulation of heat transfer during tire curing precess	24
1. Heat transfer analysis	24
2. Heat transfer in the green tire	26
3. Initial and boundary condition	27
Numerical analysis of the heat transfer model	29
1. Finite difference approximations to derivatives ...	29
2. Numerical analysis of the heat transfer model in the metal mould wall and in the green tire	33

CONTENTS (Continued)

CHAPTER		Page
	Thermophysical characterization of rubber compound and determination	36
	1. Determination of density	36
	2. Specific heat capacity versus temperature measurement	38
	3. Thermal conductivity versus temperature measurement	39
	4. Thermal diffusivity measurement	42
III	LITERATURE REVIEWS	43
IV	EXPERIMENTAL	
	General	48
	Temperature distribution by thermocouples in real time	49
	Thermophysical properties determination	52
	1. Density versus temperature measurement	52
	2. Specific heat capacity versus temperature measurement	56
V	SIMULATIONS RESULTS AND DISCUSSION	
	Comparison of simulation results with experimental data	59
	1. Discussion on ideal boundary condition of curing service condition	61
	2. Discussion on actual boundary condition of curing service and cooling cycle data	63
	Calculation of empirical thermal diffusivity and compare with literature data	64
	Application to tire curing process	67
	1. Case study I.	67
VI	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	
	Conclusions	85

CONTENTS (Continued)

CHAPTER		Page
	Recommendations	86
REFERENCES		87
APPENDIX		88
	A. Calculation of empirical thermal conductivity	89
	B. Sample calculation by computer	91
	C. Figure shows steelbelted radial tyre process	93
	D. Figure shows data recorder "YOKOGAWA HR-2400"	94
	E. Figure shows cross-section tire of light truck radial ; 195 R 14 C	95
VITA		96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

		Page
Table 2.1	The conversion factors for some of the thermal conductivity units	41
Table 2.2	Thermal conductivity and diffusivity for some materials	42
Table 5.1	Shown experimental data of temperature-time for under tread position	77
Table 5.2	Shown tread surface temperature of specimen	78
Table 5.3	Shown bladder surface temperature of specimen	79
Table 5.4	Comparison of simulation results with experimental data for ideal boundary condition	80
Table 5.5	Comparison of simulation results with experimental data for actual boundary condition	81
Table 5.6	Calculation of the empirical value of thermal conductivity and diffusivity for ideal boundary condition	82
Table 5.7	Calculation of the empirical value of thermal conductivity and diffusivity for actual boundary condition	83

LIST OF FIGURES

		Page
Figure 1.1	Typical mathematical modelling technique	3
Figure 2.1	Arrangement of calender roll	9
Figure 2.2	Curing curves of rubber compound	16
Figure 2.3	Fragment of vulcanization unit with a tyre	22
Figure 2.4	Shows thermal axis for cylindrical coordinate	23
Figure 2.5	Cross - section of the cylindrical mould	27
Figure 2.6	Approximation used in finite difference method	31
Figure 2.7	Corresponding radius at difference nodes	33
Figure 2.8	Schematic diagram of TMA.	38
Figure 3.1	Literature values for the thermal conductivity of Polyvinyl chloride	46
Figure 3.2	Literature values for the thermal conductivity of gum natural rubber	46
Figure 4.1	Shows temperature change versus time inteval recording	50
Figure 4.2	Operating with the Dilatometer accessory	54
Figure 4.3	The results of expansion versus temperature change recording from TMA.	55
Figure 4.4	Perkin-Elmer 7 Series Thermal Analysis System	57
Figure 5.1	Comparison of simulation results with experimental data for ideal boundary condition	62
Figure 5.2	Comparison of simulation results with experimental data for actual boundary condition (heating & cooling)	66
Figure 5.3	The comparison of simulation results for case study I with regular profile	68

LIST OF FIGURES (Continued)

		Page
Figure 5.4	Comparison of simulation results with experimental data for ideal boundary condition : specimen Tire #1	69
Figure 5.5	Comparison of simulation results with experimental data for ideal boundary condition : specimen Tire #2	70
Figure 5.6	Comparison of simulation results with experimental data for ideal boundary condition : specimen Tire #3	71
Figure 5.7	Comparison of simulation results with experimental data for ideal boundary condition : specimen Tire #4	72
Figure 5.8	Comparison of simulation results with experimental data for actual boundary condition (heating & cooling) specimen : Tire #1	73
Figure 5.9	Comparison of simulation results with experimental data for actual boundary condition (heating & cooling) specimen : Tire #2	74
Figure 5.10	Comparison of simulation results with experimental data for actual boundary condition (heating & cooling) specimen : Tire #3	75
Figure 5.11	Comparison of simulation results with experimental data for actual boundary condition (heating & cooling) specimen : Tire #4	76
Figure A.1	The expansion of tread compound during tire curing simulation by TMA.	90
Figure A.2	The specific heat versus temperature profile for tread compound ; measured by DSC.	90

NOMENCLATURE

A	Heat transfer area	(m^2)
Cp	Constant - pressure specific heat	(J/Kg.C)
D	Thermal diffusivity	(m^2/sec.)
Fo	Fourier's number (Dimensionless time)	
K	Thermal conductivity	(W/m.C)
r	Radial coordinate in a cylindrical polar frame	(m)
Δr	Radial increment in a cylindrical coordinate	(m)
t	Time	(sec.)
Δt	Time increment	(sec.)
T	Temperature	(C)
To	Initial temperature	(C)
Te	Ambient temperature	(C)
Tm	Temperature at the inner surface of the metal mould	(C)
Tb	Temperature at the bladder surface	(C)
dT	Temperature increment	(C)
Vo	Initial volume at time ,t=0	(sec.)
ΔV	Volumetric change	(m^3)
ρ_{avg}	Average density of rubber compound	(Kg/m^3)
ρ_p	Paste density of the rubber compound	(Kg/m^3)
ρ_s	Solid density of the rubber compound	(Kg/m^3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University