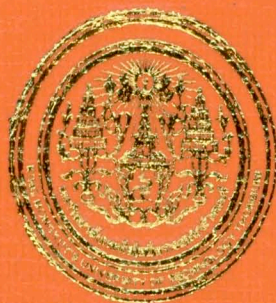


ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E47295



**IMPROVEMENT OF THERMAL EFFICIENCY
OF HEAT-REGULATING GAS BURNER**

MR. WASAN YOKSENAKUL

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF DOCTOR OF ENGINEERING (MECHANICAL ENGINEERING)
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONCKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI
2011**

500250282



Improvement of Thermal Efficiency of Heat-Recirculating Gas Burner

Mr. Wasan Yoksenakul M.Eng. (Mechanical Engineering)

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment
of the Requirements for
the Degree of Doctor of Engineering (Mechanical Engineering)
Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
2011

Thesis Committee

Somchai Chanchaona
.....
(Assoc. Prof. Somchai Chanchaona, Ph.D.)

Chairman

Sumrong Jugjai
.....
(Prof. Sumrong Jugjai, D.Eng.)

Member and Thesis advisor

Suvit Tia
.....
(Assoc. Prof. Suvit Tia, Ph.D.)

Member

Jaruwat Charoensuk
.....
(Assoc. Prof. Jaruwat Charoensuk, Ph.D.)

Member



Thesis Title	Improvement of Thermal Efficiency of Heat-Recirculating Gas Burner
Thesis Credits	36
Candidate	Mr. Wasan Yoksenakul
Thesis Advisor	Prof. Dr. Sumrerng Jugjai
Program	Doctor of Engineering
Field of Study	Mechanical Engineering
Department	Mechanical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

E 47295

A self-aspirating conventional gas burner (CB) is widely used for small and medium scale industrial plants in Thailand. Unfortunately, it possesses a relatively low thermal efficiency of about 30%. This thesis is aimed to enhance its thermal efficiency by applying a porous medium technology. A self-aspirating porous medium burner (SPMB) with matrix-stabilized flame is designed and tested to understand its phenomena. Design of the SPMB is based on the same important characteristics of the CB, i.e. using the same mixing tube and fuel nozzle. Ergun's equation involving modified Peclet number (Pe) and the CB's pressure drop across the mixing chamber is adopted to estimate the diameter of Al_2O_3 particles and the diameter of the combustion chamber. Packed bed burner of the SPMB is then formed by an alumina spheres. The SPMB yields a submerged flame with an intense thermal radiation emitted downstream for load and upstream for mixture preheating. Effects of firing rate (CL) and distance between the burner top and the bottom of loading vessel (H) on the thermal efficiency and emission characteristics are investigated along European standard (EN-203) method. CL and H are varied in the range of 21-43 kW and 75-125 mm, respectively. An average of thermal efficiency of the SPMB is higher than the typical CB of about 4.38%, thus yielding a relatively high average energy saving of about 12.84%. Moreover, a porous radiant recirculated burner (PRRB) is integrated with the SPMB to improve the thermal efficiency. At $H = 125$ mm, the average of thermal efficiency of the SPMB with PRRB is increased by 17.51% and 10.44%, respectively in comparison to the typical CB and SPMB, thus leading to energy saving of about 33.21% and

20.06%, respectively, by average over the operating range. CO emission level of the SPMB and SPMB with PRRB has relatively high as compared with the CB throughout the range of CL and H because of a lack of secondary air entrainment and incomplete combustion. But a level of NO_x emission is relatively low because of an advantage of combustion with matrix-stabilized flame. Thus this research is concluded that the porous technology can improve the thermal efficiency of the CB and considerably increase the energy saving.

Keywords : Self-Aspirating Burner / Premixed Flame / Porous Medium Burner / Heat Recirculation / SMEs

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเผาที่มี การหมุนเวียนความร้อน
หน่วยกิต	36
ผู้เขียน	นายวสันต์ โยคเสนะกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.สำเริง จักรใจ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

E47295

หัวเผาเชื้อเพลิงแก๊สชนิดเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเองทั่วไป (CB) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลางของประเทศไทย แต่เตาชนิดนี้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนค่อนข้างต่ำประมาณร้อยละ 30 วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ CB โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีของวัสดุพอร์ซัน หัวเผาวัสดุพอร์ซันที่มีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง (SPMB) และมีเปลวไฟเสถียรอยู่ในวัสดุพอร์ซันถูกออกแบบและทดสอบเพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ของมัน การออกแบบ SPMB ขึ้นอยู่กับลักษณะสำคัญที่เหมือนกันกับ CB เช่น ท่อผสมและหัวฉีดเชื้อเพลิงอันเดียวกัน เป็นต้น สมการของ Ergun พร้อมด้วยค่า Peclet number (Pe) และ ความดันตกคร่อมห้องผสมของ CB ถูกนำมาใช้คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุพอร์ซันและห้องเผาไหม้ หัวเผาวัสดุพอร์ซันของ SPMB ถูกสร้างขึ้นจากกลุ่ม Al_2O_3 ซึ่งเตา SPMB ให้เปลวไฟแบบผิงในวัสดุพอร์ซันที่มีการแผ่รังสีที่เข้มข้นส่งไปยังด้านท้ายน้ำเพื่อให้กับภาระความร้อนและส่งไปยังด้านต้นน้ำเพื่ออุ่นส่วนผสม ผลกระทบของความร้อนป้อน (CL) และระยะห่างระหว่างขอบบนของหัวเผาและก้นภาชนะ (H) ที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและลักษณะของมลพิษถูกศึกษาด้วยการทดสอบตามมาตรฐานยุโรป (EN-203) ค่า CL และ H ถูกปรับเปลี่ยนในช่วง 21-43 kW และ 75-125 มม. ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยของ SPMB มีค่าสูงกว่าของ CB อยู่ร้อยละ 4.38 ส่งผลให้มีการประหยัดพลังงานเฉลี่ยค่อนข้างสูงที่ร้อยละ 12.84 ยิ่งไปกว่านั้นเตาที่มีการหมุนเวียนความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากวัสดุพอร์ซันถูกนำมาใช้ร่วมกับ SPMB เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนขึ้นไปอีก ที่ระยะ $H = 125$ มม.

E47295

พรมถูกนำมาใช้ร่วมกับ SPMB เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนขึ้นไปอีก ที่ระยะ $H = 125$ มม. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของ SPMB กับ PRRB มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.51 และ 10.44 เมื่อเปรียบเทียบกับ CB และ SPMB ตามลำดับ ดังนั้นการประหยัดพลังงานเฉลี่ยจึงมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 33.21 และ 20.06 ตามลำดับ ตลอดช่วงการทดลอง ปริมาณการปลดปล่อย CO ของ SPMB และ SPMB กับ PRRB มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ CB ตลอดช่วงของ CL และ H เพราะว่าการเหนี่ยวนำอากาศปฐมภูมิไม่เพียงพอ และการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่ปริมาณการปลดปล่อย NO_x มีค่าค่อนข้างต่ำเพราะว่าข้อดีของการเผาไหม้ที่มีเสถียรภาพในวัสดุพรม ดังนั้นงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าเทคโนโลยีวัสดุพรมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ CB ได้และส่งผลให้มีการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: หั้วเผาที่เหนี่ยวนำอากาศด้วยตัวเอง / เปลวไฟชนิดผสมกันมาก่อน / หั้วเผาวัสดุพรม / การหมุนเวียนความร้อน / วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

ACKNOWLEDGEMENTS

This research work would not have been possible without the help and active collaboration of many people to whom I acknowledge my indebtedness and sincere gratitude and appreciation.

Firstly, I would like to express sincere thanks to my advisor, Prof. Dr. Sumrerng Jugjai, for the valuable suggestions, attentive interest, kind recommendations and everything in this study. Sincere thanks to the members of my dissertation committee, Assoc. Prof. Dr. Somchai Chanchaona, Assoc. Prof. Dr. Suvit tia and Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk for their valuable time and suggestions. Furthermore, I would to thank Dr. Wishanurak Wechsitol for kindness and spending valuable time proof-reading this thesis.

The CERL (Combustion and Engines Research Laboratory) staff was, as usual, enormously helpful. Many thanks are due to Apinunt Namkhat, Chanon Chuenchit, Kanokkarn Wongwatcharaphon, Peerayut Tongtem, Pheerapong Toklib, Prinya Pookertsin, Ronnachart Munsin and Usa Makmool.

Finally, very special thanks to my family, Saroj, Supranee, Narumol and Sathit, for their many sacrifices during the development of this thesis. At the last, I would like to thank Touchdao Saelhim for their encouragement with her love and understanding throughout my study program.

CONTENTS

	PAGE
ENGLISH ABSTRACT	iii
THAI ABSTRACT	v
ACKNOWLEDGEMENT	vii
CONTENTS	viii
LIST OF TABLES	xi
LIST OF FIGURES	xii
LIST OF SYMBOLS	xvi

CHAPTER

1. INTRODUCTION	1
1.1 Rationale	1
1.2 Literature Reviews	3
1.3 Objective	5
1.4 Scope	5
1.5 Significance and Usefulness	5
 2. THEORY	 6
2.1 Self-aspirating Gas Burner	6
2.2 Heat Recirculation Combustion	7
2.3 Reduction of Energy Consumption by Air Preheating	8
2.4 Effective Method for Combustion Air Preheating	10
2.5 Porous Material	11
2.6 Porous Structures	13
2.6.1 Discrete Element	13
2.6.2 Cellular Structures	14
2.7 Porosity of Porous Medium	14

3. DESIGN OF A SPMB AND FREE FLAME TEST	16
3.1 Design of SPMB	16
3.2 Setup and Preliminary Test	19
3.3 Results of the SPMB's Free Flame	22
3.3.1 Evolution of Temperature within the SPMB	22
3.3.2 Flame Movement Phenomena	24
3.3.3 Effect of <i>CL</i> on Temperature Distribution	26
3.3.4 Effect of <i>CL</i> on Pressure Drop and Primary Aeration	27
3.3.5 Emission Characteristic of SPMB's Free Flame	28
3.3.6 Radiative Heat Loss and Output Radiation Efficiency	29
 4. AN IMPINGEMENT FLAME OF SPMB AND CB	 34
4.1 Experiment Setup	34
4.2 Results of Impinging Flame of the SPMB	36
4.2.1 Primary Aeration	36
4.2.2 Emission Characteristics	37
4.2.3 Temperature Distribution	40
4.2.4 Thermal Efficiency	42
4.2.5 Energy Saving	43
 5. AN IMPINGEMENT FLAME OF SPMB WITH POROUS RADIANT RECIRCULATED BURNER	 45
5.1 Experiment Setup	45
5.2 Results of Impinging Flame of the SPMB with PRRB	48
5.2.1 Preheated Air Temperature	48
5.2.2 Primary Aeration	50
5.2.3 Emission Characteristics	51
5.2.4 Temperature Distribution	55
5.2.5 Thermal Efficiency	57
5.2.6 Energy Saving	59
5.2.7 Development of the Thermal Efficiency	61

6. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS FOR FUTURE WORKS	63
6.1 Conclusions	63
6.2 Recommendations for Future Works	64
REFERENCES	65
APPENDIX	
A Photograph of apparatus and flame shape	72
B Experimental data in graph	83
C Experimental data in table	90
D Contribution of heat transfer of the SPMB and SPMB with PRRB	102
E Drawing of the SPMB and PRRB	109
CIRRICULUM VITAE	128

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
4.1 Experimental conditions for impinging flame.	36
4.2 Emission level of impinging flame of the SPMB.	38
4.3 Maximum temperature in packed bed of the SPMB.	42
4.4 Thermal efficiency for the CB and SPMB.	43
4.5 Energy saving of the SPMB as compared with the CB.	44
5.1 Experimental conditions for SPMB with PRRB.	47
5.2 Temperature of preheated primary air of the SPMB with PRRB.	49
5.3 Average emission levels of the SPMB with PRRB.	52
5.4 Maximum temperature in packed bed of the SPMB with PRRB.	55
5.5 Thermal efficiency for the SPMB with PRRB.	57
5.6 Energy saving of the self-aspirating gas burner at $H = 125\text{mm}$.	60
C.1 Effect of gas fuel nozzle diameter on PA of the CB.	90
C.2 Comparisons of PA and ΔP between the CB and SPMB.	91
C.3 Temperature profile within a packed bed of SPMB's free flame.	91
C.4 Effect of secondary air on thermal performance of the CB at $H = 100\text{ mm}$.	92
C.5 Effect of nozzle diameter on thermal performance of the SPMB.	93
C.6 Temperature of SPMB at $H = 100\text{ mm}$ and nozzle diameter = 1.4 mm .	93
C.7 Temperature of SPMB at $H = 100\text{ mm}$ and nozzle diameter = 1.5 mm .	94
C.8 Temperature in packed bed of the SPMB at $CL = 21\text{ kW}$.	94
C.9 Temperature in packed bed of the SPMB at $CL = 34\text{ kW}$.	95
C.10 Temperature in packed bed of the SPMB at $CL = 44\text{ kW}$.	95
C.11 Combustion performance of the CB.	96
C.12 Combustion performance of the SPMB.	97
C.13 Temperature in packed bed of the SPMB with PRRB at $CL = 21\text{ kW}$.	98
C.14 Temperature in packed bed of the SPMB with PRRB at $CL = 34\text{ kW}$.	98
C.15 Temperature in packed bed of the SPMB with PRRB at $CL = 44\text{ kW}$.	99
C.16 Combustion performance of the SPMB with PRRB.	99
C.17 Comparison of thermal efficiency.	100
C.18 Output radiation efficiency and radiative heat loss of free flame.	101

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
1.1 Self-aspirating conventional gas burner.	2
1.2 LPG consumption in Thailand.	2
2.1 The general layout of self-aspirating gas burner.	6
2.2 Concept of heat recirculation.	7
2.3 Enthalpy histories between systems with and without heat recirculation.	8
2.4 Effect of preheating air temperature on energy savings.	9
2.5 Porous medium heat exchanger.	10
2.6 Examples of porous materials.	11
2.7 Examples of porous structures.	13
2.8 Discrete elements.	13
2.9 Porous ceramics.	14
3.1 A relationship between CL and L and V_p .	18
3.2 Initial 3-D design of the SPMB.	18
3.3 Schematic diagram of the experiment setup of SPMB.	19
3.4 Photograph of the SPMB's details.	20
3.5 A history of SPMB's temperature.	23
3.6 Transient temperature distributions along the length of the SPMB.	24
3.7 Effect of CL on steady state temperature distribution.	26
3.8 Effect of CL on ΔP and PA .	27
3.9 Emission of free flame of the SPMB.	28
3.10 Simplified model for computing a radiative heat loss at the inlet and an output radiation efficiency at the exit of the SPMB.	29
3.11 Effect of CL on $\eta_{\text{rad, loss}}$ and η_{rad} .	32
4.1 Schematic diagram of SPMB's impinging flame experiment setup.	34
4.2 Primary aeration of impinging flame.	36
4.3 CO emissions of impinging flame of the SPMB and CB.	39
4.4 NO _x emissions of impinging flame of the SPMB and CB.	39
4.5 Temperature distributions in packed bed of impinging flame at 21 kW.	40
4.6 Temperature distributions in packed bed of impinging flame at 34 kW.	41
4.7 Temperature distributions in packed bed of impinging flame at 44 kW.	41
4.8 Thermal efficiency and energy saving of impinging flame.	43

5.1	Schematic diagram of impinging flame test for SPMB with PRRB.	47
5.2	Details of the SPMB with PRRB.	48
5.3	Preheated primary air temperature of the SPMB with PRRB.	49
5.4	Primary aeration of the SPMB with PRRB.	50
5.5	Comparison of PA at $H = 125$ mm.	50
5.6	CO emissions of impinging flame of the SPMB with PRRB.	53
5.7	Comparison of CO emission levels at $H = 125$ mm.	53
5.8	NO _x emissions of impinging flame of the SPMB with PRRB.	54
5.9	Comparison of NO _x emission levels at $H = 125$ mm.	54
5.10	Temperature distributions in packed bed of SPMB with PRRB at 21 kW.	56
5.11	Temperature distributions in packed bed of SPMB with PRRB at 34 kW.	56
5.12	Temperature distributions in packed bed of SPMB with PRRB at 44 kW.	57
5.13	Thermal efficiency of impinging flame of the SPMB with PRRB.	58
5.14	Comparison of η_{th} at $H = 125$ mm.	58
5.15	Comparison of energy saving at $H = 125$ mm.	60
5.16	Development of thermal efficiency.	61
A.1	Alumina spheres with particle diameter of $d = 0.015$ m (porous medium).	73
A.2	SPMB with thermocouples.	73
A.3	Mixing tube of the SPMB in chapter 3.	73
A.4	SPMB with and without porous medium (top view).	74
A.5	Packed bed at shut down condition.	74
A.6	Packed bed weight.	74
A.7	SPMB with PRRB (side view).	75
A.8	SPMB with PRRB (top view).	75
A.9	Emitting porous medium (EP).	76
A.10	Mixing tube of the SPMB and CB in chapters 4 and 5.	76
A.11	LPG tanks and LPG vaporizer.	76
A.12	Thermal performance platform.	77
A.13	Flame shape in SPMB at variation of CL .	78
A.14	Impingement flame of the SPMB at 34 kW and $H = 50$ mm.	78
A.15	Impingement flame of the SPMB at 44 kW and $H = 100$ mm.	79
A.16	Impingement flame of the SPMB at 44 kW and $H = 200$ mm.	79
A.17	Flame shape and temperature profile in packed bed of free flame of the SPMB with PRRB.	80

A.18	Impingement flame of the SPMB with PRRB at 44 kW and $H=125$ mm.	81
A.19	Impingement flame of the SPMB with PRRB at 44 kW and $H=200$ mm.	81
B.1	Effect of gas fuel nozzle diameter on PA of the CB.	83
B.2	Comparisons of PA and ΔP between the CB and SPMB.	83
B.3	Temperature profile within a packed bed of SPMB's free flame.	84
B.4	CB without secondary air inlet.	84
B.5	Effect of secondary air on thermal efficiency of the CB.	85
B.6	Effect of secondary air on CO and NO _x emissions of the CB.	85
B.7	Effect of nozzle diameter on thermal efficiency of the SPMB.	86
B.8	Effect of nozzle diameter on PA of the SPMB.	86
B.9	Effect of nozzle diameter on CO emission of the SPMB.	87
B.10	Effect of nozzle diameter on NO _x emission of the SPMB.	87
B.11	The SPMB's temperature profile of nozzle diameter = 1.4 mm.	88
B.12	The SPMB's temperature profile of nozzle diameter = 1.5 mm.	88
D.1	Simplified model for contribution of thermal efficiency.	103
D.2	View factor model for coaxial parallel disks.	104
D.3	Contribution of thermal efficiency of the SPMB at $H = 50$ mm.	105
D.4	Contribution of thermal efficiency of the SPMB at $H = 75$ mm.	105
D.5	Contribution of thermal efficiency of the SPMB at $H = 100$ mm.	106
D.6	Contribution of thermal efficiency of the SPMB at $H = 125$ mm.	106
D.7	Contribution of thermal efficiency of the SPMB at $H = 175$ mm.	107
D.8	Thermal efficiency contribution of the SPMB with PRRB at $H = 125$ mm.	107
D.9	Thermal efficiency contribution of the SPMB with PRRB at $H = 175$ mm.	108
E.1	Drawing of self-aspirating porous medium burner (SPMB).	110
E.2	Assembly of self-aspirating porous medium burner (SPMB).	111
E.3	Drawing of combustion chamber (SPMB).	112
E.4	Drawing of high temperature cement (SPMB).	113
E.5	Drawing of flash back ring (SPMB).	114
E.6	Drawing of perforated stainless steel plate (SPMB).	115
E.7	Drawing of seal ring (SPMB).	116
E.8	Drawing of mixing chamber (SPMB).	117
E.9	Drawing of mixing tube (SPMB).	118
E.10	Drawing of gas fuel nozzle (SPMB).	119
E.11	Drawing of porous radiant recirculated burner (PRRB).	120

E.12 Assembly of porous radiant recirculated burner (PRRB).	121
E.13 Drawing of emitting porous medium (PRRB).	122
E.14 Drawing of inner housing (PRRB).	123
E.15 Drawing of absorbing porous medium (PRRB).	124
E.16 Drawing of outer housing (PRRB).	125
E.17 Drawing of shutter 1 (PRRB).	126
E.18 Drawing of shutter 2 (PRRB).	127

LIST OF SYMBOLS

SYMBOL		UNIT
A	cross-sectional area of packed bed	m^2
AP	absorbing porous medium	
$(A/F)_{\text{stoi}}$	stoichiometric air/ fuel ratio	
c_p	specific heat at constant pressure	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
CB	conventional self-aspirating gas burner	
CL	firing rate	kW
d	particle diameter	m
D	diameter	m
EN	energy saving	$\%$
EP	emitting porous medium	
E_n	exponential integral function	
H	distance between burner top and bottom of loading vessel	mm
I	radiation intensity	W/m^2
k	thermal conductivity	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
L	length of packed bed	m
LHV	low heating value	MJ/m^3
m	mass	kg
n_p	number density	$1/m^3$
$\%O_2$	oxygen concentration	$\%$
p	pressure	
Pe	Peclet number	
ΔP	pressure drop	mmH_2O
PA	primary aeration	$\%$
$PRRB$	porous radiant recirculated burner	
q	radiative heat flux	W/m^2
Q	volume flow rate of mixture	m^3/s
$SPMB$	self-aspirating porous medium burner	
S_L	laminar flame speed	m/s
t	time	s
T	temperature	$^{\circ}\text{C}$
U	superficial velocity of packed bed	m/s

V	interstitial velocity in packed bed	m/s
V_c	gas volume corrected	m^3
V_{mes}	gas volume measured	m^3
X	distance	m

Greek symbols

ε	void fraction or porosity	
$\varepsilon_{R,eff}$	effective emissivity of packed bed	
$\varepsilon_{R,s}$	emissivity of a solid sphere	
Φ	equivalence ratio	
κ	absorption coefficient	m^{-1}
μ	mixture viscosity	Ns/m^2
η	efficiency	%
ρ	density, kg/m^3	
σ	Stefan-Boltzmann constant = 0.5669×10^{-8}	W/m^2-K^4
τ	optical thickness	m^{-1}

Superscripts

+	positive direction
-	negative direction
n	net

Subscripts

b	black-body
E	exit
i	initial
p	packed bed
pre	preheated
$rad, loss$	radiative heat loss
rad	radiation
th	thermal
w	water
$0, \infty$	boundary or ambient