

HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF COOLING TOWER WITH NANOFLUIDS

MD. HABIBUR RAHMAN (Roll No: 1014180002P)

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering



DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
MILITARY INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DHAKA,
BANGLADESH

JULY 2025

HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF COOLING TOWER WITH NANOFLUIDS

Ph.D. Thesis

By

MD. HABIBUR RAHMAN (Roll No: 1014180002P)

Approved as to style and content by the Board of Examination on July 2025:

Dr Mohammad Ali Professor Department of Mechanical Engineering, BUET, Dhaka	Chairman (Supervisor) Board of Examination
---	---

Lieutenant Colonel Md Altab Hossain, PhD Instructor Class A Department of Nuclear Science and Technology, MIST, Dhaka	Co-Supervisor
---	---------------

Dr S M Ikhtiar Mahmud Assistant Professor Department of Naval Architecture and Marine Engineering, MIST, Dhaka	Member (Internal)
--	-------------------

Dr Mohammad Mamun Professor Department of Mechanical Engineering, BUET, Dhaka	Member (External)
---	-------------------

Dr A K M Sadrul Islam Professor (Retd) Department of Mechanical Engineering, BUET, Dhaka	Member (External)
--	-------------------

Brigadier General Md Anisur Rahman MIST, Dhaka	Head of the Department Member (Ex-Officio)
---	---

Department of Mechanical Engineering, MIST, Dhaka

HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF COOLING TOWER WITH NANOFLUIDS

DECLARATION

I hereby declare that the study reported in this thesis entitled as above is my own original work and has not been submitted anywhere for any degree or other purposes. Further I certify that the intellectual content of this thesis is the product of my own work and that all the assistance received in preparing this thesis and sources have been acknowledged and cited in the reference Section.

Md. Habibur Rahman

Department of Mechanical Engineering, MIST, Dhaka

HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF COOLING TOWER WITH NANOFLUIDS

A Thesis

By

Md Habibur Rahman

DEDICATION

Dedicated to my family members for supporting and encouraging me to
believe in myself

APPROVAL CERTIFICATE

The thesis titled “Heat Transfer Performance of Cooling Tower with Nanofluids” submitted by Md. Habibur Rahman, Roll No: 1014180002P, Session: 2014-15 has been accepted as satisfactory in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering on July 20, 2025.

ABSTRACT

Heat Transfer Performance of Cooling Tower with Nanofluids

Cooling towers are evaporative heat transfer devices in which atmospheric air cools warm water with direct contact between the air and the water by evaporating cooling of water. The main objective of this study is to analysis the cooling tower performance, with induced draft cooling tower and finding out the effect of adding nanofluids of Al Oxide (Al_2O_3), Zn Oxide (ZnO), and Ti Oxide (Ti_2O_3) with base fluid as water. This was done by establishing experimental set up supported with computer program and varying the quality of circulating fluids by adding together at different ratio. Recently large numbers of experiments have been carried out to evaluate the effect of nanofluid in enhancement of the heat transfer rate in various heat exchangers. The heat transfer enhancement using nanofluid mainly depends on type of nanoparticles, size of nanoparticles, shape of nanoparticles, and type of base fluid and concentration of nanoparticles in the base fluid. Therefore, this study deals with several experimental investigation of the thermal performance of a prototype mechanical wet cooling tower with a counter flow arrangement. Different volume concentrations ranging from 0.18 to 0.50 vol. % of stable Al Oxide (Al_2O_3), Zn Oxide (ZnO), and Ti Oxide (Ti_2O_3) nanoparticles of 80, 35, and 70 nm diameter were considered. Water was taken as a base fluid, and the experiment was carried out at 60, 70, and 80 °C, respectively, in laboratory conditions. The study revealed that an increase in the volume concentration of the nanofluids increased the cooling range, cooling efficiency, convective heat transfer coefficient, tower characteristic called number of transfer unit (NTU), and effectiveness of the cooling tower compared with water at the same mass flow rate and inlet temperature. However, increasing the volume concentration increased the viscosity of the nanofluids, leading to an increase in friction factor. From the result it has been obtained a comparative study on terms of tower characteristics (k_{av}/L), water to air flow ratio (L/G), efficiency, range, percentage of make-up water and evaporation heat loss are presented in graphical form. The graph shows that the performance of cooling tower is affected by the type of cooling tower and the quality of circulating fluids. The graphical analysis shows the cooling tower characteristics and efficiency decreases with an increase in (L/G), the induced draft cooling tower shows better performance than natural draft cooling tower. It is revealed that at higher volume concentration of nanofluid, cooling range would increase by 29% at low flow rates which is also

accompanied by the heat lost by water, and thereby, average increase in efficiency is 27% at temperature 80°C. This happens more significantly with Al₂O₃ and ZnO nanoparticles when they are added in base fluid with different ratios. For instance, for 0.18% volume concentration of ZnO, at an inlet water temperature of 66.4 °C and water/air (L/G) flow ratio of 1.93, the cooling range increased by 3.62%, cooling efficiency increased by 33.3%, and NTU increased by 50.5% compared with fresh water (FW).

Prediction of thermal performance is necessary for thermo-fluid engineering applications as well as manufacturing industries. Hence, the validation of the developed mathematical model in this study has been carried out by making comparison of the measured and predicted thermal performance. This study presents an intelligent approach based on fuzzy expert system (FES) of a cooling tower. FES links between volumetric concentration (VC), mass flow rate of liquid to air ratio (L/G) and flow rate (FR) and cooling efficiency (CE) and range (CR). To validate the mathematical model, the thermal performance in terms of cooling efficiency (CE) and cooling range (CR), L/G and liquid flow rate are measured on the developed cooling tower and compared with the predicted ones. Values are obtained from experiments on an induced draft cooling tower with nanofluids in different VC of 0%, 0.06%, 0.18% and 0.30%, respectively. The efficiency of nanofluids slightly increases about 5.04–8.82% with the growth of VC related to water at the highest value of L/G. Whereas, the efficiency significantly increased about 11–50% with the increase of VC at the lowest value of L/G. FES model has been developed for the prediction of cooling efficiency and range with nanofluid in different VC. For instance, in case of CE, the mean of measured (experiment) and predicted (FES) values have been found as 15.84% and 15.90%, respectively. Similarly, for CR, the values have been found as 3.30°C and 3.28°C, respectively. The correlation coefficients of cooling efficiency and cooling range are found as 0.961, and 0.997, respectively. The mean relative error of measured and predicted values from the FES model on cooling efficiency and cooling range are found as 9.0 % and 5.87 %, respectively. For all parameters, the relative error of predicted values are found to be less than the acceptable limits of 10 %. The goodness of fit of the prediction values from the FES model on cooling efficiency and cooling range are found as 0.960 and 0.987, respectively, which are found to be close to 1.0 as projected. The results indicate that there is less variability of the measured data and predicted data

of the counter flow induced draft cooling tower with water and with nanofluids in different volume concentration. It also indicates that the predicted data over the measured data has a good agreement and thus substantiates the validity of the mathematical model. In this study, according to assessment principles of predicted performance of the developed fuzzy expert system based intelligent model has been found to be valid. It is an innovative adaption leading to technological capacity building which has a remarkable contribution to enhance the machine life, better-efficient outcome and friendly to the aquatic and environmental system.

সারাংশ

Heat Transfer Performance of Cooling Tower with Nanofluids

ন্যানোফ্লুইড দিয়ে কুলিং টাওয়ারের তাপ স্থানান্তর কর্মক্ষমতা

কুলিং টাওয়ার হল বাষ্পীভবনকারী তাপ স্থানান্তর যন্ত্র যেখানে বায়ুমণ্ডলীয় বায়ু উষ্ণ জলকে ঠাণ্ডা করে, বাতাস এবং জলের মধ্যে সরাসরি যোগাযোগের মাধ্যমে জলকে বাষ্পীভূত করে। এই গবেষণার মূল উদ্দেশ্য হল প্ররোচিত ড্রাফ্ট কুলিং টাওয়ারের কার্যকারিতা বিশ্লেষণ করা এবং জল হিসাবে বেস তরলের সাথে এলুমিনিয়াম অক্সাইড (Al_2O_3), Zn অক্সাইড (ZnO), এবং Ti অক্সাইড (Ti_2O_3) এর ন্যানোফ্লুইড যোগ করার প্রভাব খুঁজে বের করা। এটি কম্পিউটার প্রোগ্রামের সাহায্যে পরীক্ষামূলক সেট আপ স্থাপন করে এবং বিভিন্ন অনুপাতে একসাথে যোগ করে সঞ্চালিত তরলের গুণমান পরিবর্তন করে করা হয়েছিল। সম্ভ্রতি বিভিন্ন তাপ এক্সচেঞ্জারে তাপ স্থানান্তর হার বৃদ্ধিতে ন্যানোফ্লুইডের প্রভাব মূল্যায়নের জন্য প্রচুর পরীক্ষা-নিরীক্ষা করা হয়েছে। ন্যানোফ্লুইড ব্যবহার করে তাপ স্থানান্তর বৃদ্ধি মূলত ন্যানো পার্টিকেলের ধরণ, ন্যানো পার্টিকেলের আকার, ন্যানো পার্টিকেলের আকৃতি, বেস তরলের ধরণ এবং বেস তরলে ন্যানো পার্টিকেলের ঘনত্বের উপর নির্ভর করে। অতএব, এই গবেষণাটি একটি পাল্টা প্রবাহ ব্যবস্থা সহ একটি প্রোটোটাইপ যান্ত্রিক ভেজা কুলিং টাওয়ারের তাপীয় কর্মক্ষমতার বেশ কয়েকটি পরীক্ষামূলক তদন্ত নিয়ে আলোচনা করে। ৮০, ৩৫ এবং ৭০ ন্যানোমিটার ব্যাসের স্থিতিশীল এলুমিনিয়াম অক্সাইড (Al_2O_3), Zn অক্সাইড (ZnO) এবং Ti অক্সাইড (Ti_2O_3) ন্যানো পার্টিকেলের ০.১৮ থেকে ০.৫০ ভলিউম পর্যন্ত বিভিন্ন আয়তনের ঘনত্ব বিবেচনা করা হয়েছিল। জলকে একটি বেস তরল হিসাবে নেওয়া হয়েছিল এবং পরীক্ষাগারের পরিস্থিতিতে যথাক্রমে ৬০, ৭০ এবং ৮০ °C তাপমাত্রায় পরীক্ষা করা হয়েছিল। গবেষণায় দেখা গেছে যে ন্যানোফ্লুইডের আয়তনের ঘনত্ব বৃদ্ধির ফলে শীতলকরণের পরিসর, শীতলকরণ দক্ষতা, পরিচলন তাপ স্থানান্তর সহগ, স্থানান্তর ইউনিটের সংখ্যা (NTU) নামক টাওয়ারের বৈশিষ্ট্য এবং একই ভর প্রবাহ হার এবং প্রবেশ তাপমাত্রার জলের তুলনায় কুলিং টাওয়ারের কার্যকারিতা বৃদ্ধি পেয়েছে। তবে, আয়তনের ঘনত্ব বৃদ্ধির ফলে ন্যানোফ্লুইডের সান্দ্রতা বৃদ্ধি পেয়েছে, যার ফলে ঘর্ষণ ফ্যাক্টর বৃদ্ধি পেয়েছে। ফলাফল থেকে টাওয়ারের বৈশিষ্ট্য (kav/L), জল থেকে বায়ু প্রবাহ অনুপাত (L/G), দক্ষতা, পরিসর, তৈরি জলের শতাংশ এবং বাষ্পীভবন তাপ হ্রাসের উপর একটি তুলনামূলক গবেষণা গ্রাফিক্যাল আকারে উপস্থাপন করা হয়েছে। গ্রাফটি দেখায় যে কুলিং টাওয়ারের কর্মক্ষমতা কুলিং টাওয়ারের ধরণ এবং সঞ্চালিত তরলের গুণমান দ্বারা প্রভাবিত হয়। গ্রাফিক্যাল বিশ্লেষণ দেখায় যে কুলিং টাওয়ারের বৈশিষ্ট্য এবং দক্ষতা হ্রাস পায় (L/G বৃদ্ধির সাথে, প্ররোচিত ড্রাফ্ট কুলিং টাওয়ার প্রাকৃতিক ড্রাফ্ট কুলিং টাওয়ারের তুলনায় ভাল কর্মক্ষমতা দেখায়। এটি প্রকাশিত হয়েছে যে ন্যানোফ্লুইডের উচ্চ আয়তনের ঘনত্ব, কম প্রবাহ হারে শীতলকরণের পরিসর 29% বৃদ্ধি পাবে যা জল দ্বারা তাপ হারানোর সাথেও যুক্ত হবে এবং এর ফলে, 80°C তাপমাত্রায় দক্ষতার গড় বৃদ্ধি 27% হয়। Al_2O_3 এবং ZnO ন্যানো পার্টিকেলগুলির সাথে এটি আরও উল্লেখযোগ্যভাবে ঘটে যখন এগুলি বিভিন্ন অনুপাতের সাথে বেস ফ্লুইডে যুক্ত করা হয়। উদাহরণস্বরূপ, ZnO এর 0.18% আয়তনের ঘনত্বের জন্য, 66.4 °C এর ইনলেট জল তাপমাত্রা এবং 1.93 এর জল/বায়ু (L/G) প্রবাহ

অনুপাতের সাথে, শীতলকরণের পরিসর 3.62% বৃদ্ধি পেয়েছে, শীতলকরণের দক্ষতা 33.3% বৃদ্ধি পেয়েছে এবং NTU 50.5% বৃদ্ধি পেয়েছে তাজা জলের (FW) তুলনায়।

তাপ-তরল প্রকৌশল প্রয়োগের পাশাপাশি উৎপাদন শিল্পের জন্য তাপীয় কর্মক্ষমতার পূর্বাভাস প্রয়োজনীয়। অতএব, এই গবেষণায় উন্নত গাণিতিক মডেলের বৈধতা পরিমাপিত এবং পূর্বাভাসিত তাপীয় কর্মক্ষমতার তুলনা করে সম্পন্ন করা হয়েছে। এই গবেষণাটি একটি কুলিং টাওয়ারের ফাজি এক্সপার্ট সিস্টেম (FES) এর উপর ভিত্তি করে একটি বুদ্ধিমান পদ্ধতি উপস্থাপন করে। FES আয়তন ঘনত্ব (VC), তরল থেকে বায়ু অনুপাতের ভর প্রবাহ হার (L/G) এবং প্রবাহ হার (FR) এবং শীতল দক্ষতা (CE) এবং পরিসর (CR) এর মধ্যে সংযোগ স্থাপন করে। গাণিতিক মডেলটি যাচাই করার জন্য, শীতল দক্ষতা (CE) এবং শীতল পরিসর (CR), L/G এবং তরল প্রবাহ হারের পরিপ্রেক্ষিতে তাপীয় কর্মক্ষমতা উন্নত কুলিং টাওয়ারে পরিমাপ করা হয় এবং পূর্বাভাসিতগুলির সাথে তুলনা করা হয়। যথাক্রমে 0%, 0.06%, 0.18% এবং 0.30% এর বিভিন্ন VC-তে ন্যানোফ্লুইড সহ একটি প্ররোচিত ড্রাফ্ট কুলিং টাওয়ারের পরীক্ষা থেকে মানগুলি পাওয়া যায়। L/G এর সর্বোচ্চ মান জলের সাথে সম্পর্কিত VC-এর বৃদ্ধির সাথে ন্যানোফ্লুইডের দক্ষতা সামান্য 5.04–8.82% বৃদ্ধি পায়। অন্যদিকে, L/G এর সর্বনিম্ন মান VC বৃদ্ধির সাথে সাথে দক্ষতা উল্লেখযোগ্যভাবে প্রায় 11-50% বৃদ্ধি পেয়েছে। বিভিন্ন VC-তে ন্যানোফ্লুইড ব্যবহার করে শীতলকরণ দক্ষতা এবং পরিসরের পূর্বাভাসের জন্য FES মডেল তৈরি করা হয়েছে। উদাহরণস্বরূপ, CE এর ক্ষেত্রে, পরিমাপিত (পরীক্ষামূলক) এবং পূর্বাভাসিত (FES) মানের গড় যথাক্রমে 15.84% এবং 15.90% হিসাবে পাওয়া গেছে। একইভাবে, CR এর ক্ষেত্রে, মানগুলি যথাক্রমে 3.30°C এবং 3.28°C হিসাবে পাওয়া গেছে। শীতলকরণ দক্ষতা এবং শীতলকরণ পরিসরের পারস্পরিক সম্পর্ক সহগ যথাক্রমে 0.961 এবং 0.997 হিসাবে পাওয়া গেছে। শীতলকরণ দক্ষতা এবং শীতলকরণ পরিসরের উপর FES মডেল থেকে পরিমাপিত এবং পূর্বাভাসিত মানের গড় আপেক্ষিক ত্রুটি যথাক্রমে 9.0% এবং 5.87% হিসাবে পাওয়া গেছে। সমস্ত প্যারামিটারের জন্য, পূর্বাভাসিত মানগুলির আপেক্ষিক ত্রুটি 10% এর গ্রহণযোগ্য সীমার চেয়ে কম পাওয়া গেছে। FES মডেল থেকে শীতলকরণ দক্ষতা এবং শীতলকরণ পরিসরের উপর পূর্বাভাস মানগুলির উপযুক্ততার গুণমান যথাক্রমে 0.960 এবং 0.987 হিসাবে পাওয়া গেছে, যা অনুমান অনুসারে 1.0 এর কাছাকাছি পাওয়া গেছে। ফলাফলগুলি নির্দেশ করে যে পরিমাপিত ডেটা এবং কাউন্টার ফ্লো ইনডিউসড ড্রাফ্ট কুলিং টাওয়ারের জল এবং বিভিন্ন আয়তনের ঘনত্বের ন্যানোফ্লুইড সহ পূর্বাভাসিত ডেটার কম পরিবর্তনশীলতা রয়েছে। এটি আরও নির্দেশ করে যে পরিমাপিত ডেটার সাথে পূর্বাভাসিত ডেটার একটি ভাল মিল রয়েছে এবং এইভাবে গাণিতিক মডেলের বৈধতা প্রমাণ করে। এই গবেষণায়, উন্নত ফাজি বিশেষজ্ঞ সিস্টেম ভিত্তিক বুদ্ধিমান মডেলের পূর্বাভাসিত কর্মক্ষমতার মূল্যায়ন নীতি অনুসারে বৈধ বলে প্রমাণিত হয়েছে। এটি একটি উদ্ভাবনী অভিযোজন যা প্রযুক্তিগত ক্ষমতা বৃদ্ধির দিকে পরিচালিত করে যা মেশিনের জীবনকাল বৃদ্ধি, আরও দক্ষ ফলাফল এবং জলজ এবং পরিবেশগত ব্যবস্থার জন্য বন্ধুত্বপূর্ণ।

ACKNOWLEDGMENTS

At first, the author expresses his heartiest thanks to the Almighty Allah for giving the patience and potentiality to complete the thesis work. I also express my appreciation to all the people who have given their hearts whelming full support in preparing and completing the study.

I am highly pleased to express my sincere and profound gratitude to my supervisor Dr. Mohammad Ali, Professor, Department of Mechanical Engineering, Bangladesh University of Engineering & Technology (BUET), Dhaka, Bangladesh for providing me the opportunity to conduct research on nanofluids for cooling tower. I wish to express my deepest thanks to him for his continuous with patience guidance, suggestions, inspiring advice, constructive suggestions with enthusiastic supervision and wholehearted help throughout the course of the work.

I am also thankful to Lt Col Md. Altab Hossain, PhD, Associate Professor, Dept of Nuclear Science and Engineering (NSE), Military Institute of Science and Technology (MIST), Dhaka for his continuous guidance to shape my research work. I am also grateful to Head and all Faculty Members, Dept of Mechanical Engineering for their dedicated and relentless support both for literature and experimental work.

I would also express my deepest gratitude to my wife, my beloved sons and other family members for their support and encouragement.

Finally, I am grateful to almighty Allah for enabling me to complete the thesis.

TABLE OF CONTENTS

Acknowledgments	xi
Abstract	vi
List of Tables	xvi
List of Figures	xvii
List of Abbreviations	xix
List of Symbols	xx
CHAPTER 1: INTRODUCTION	1
1.1 Background of the Study.....	1
1.2 Problem Statement and Its Significance	6
1.3 Research Objectives	8
1.4 Research Methodology	8
1.5 Organization of the Thesis	10
CHAPTER 2: LITERATURE REVIEW	12
2.1 Introduction	12
2.2 First Law of Thermodynamics	13
2.3 Second Law of Thermodynamics	15
2.4 Modes of Heat Transfer	17
2.4.1 Heat Transfer by Conduction.....	18
2.4.2 Heat Transfer by Convection	20
2.4.3 Heat transfer by Radiation	20
2.4.4 Heat transfer by Evaporation	20
2.5 Fluid Properties	23
2.5.1 Viscosity.....	23
2.5.2 Viscous Flow	23
2.5.3 Non-viscous Flow	24
2.5.4 Newton’s Law of Viscosity	24
2.5.5 Newtonian Fluid	24
2.5.6 Non Newtonian Fluid	24
2.5.7 Compressibility	25

2.5.8	Compressible Flow	25
2.5.9	Incompressible Flow	25
2.6	Heat Transfer Characteristics and Definitions	25
2.6.1	Thermal Diffusivity	26
2.6.2	Thermal Conductivity	26
2.6.3	Internal and External Flows	27
2.6.4	Magnetohydrodynamics	27
2.7	The Effectiveness–NTU Method.....	28
2.8	Cooling Challenge.....	30
2.9	Conventional Methods to Enhance Heat Transfer	31
2.9.1	Conventional Solid-Liquid Suspensions and Their Limitations	31
2.9.2	Micro Channel Cooling and Its Limitations.....	33
2.9.3	Literature Survey on Black Shoot.....	33
2.9.4	Introduction to Heat Transfer with Nanofluids	34
2.9.5	Preparation of Nanofluids.....	36
2.9.6	Thermal Conductivity of Nanofluids in Experimental Investigations Study	37
2.9.7	The Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluids	37
2.9.8	The Effect of Particle Volume Fraction on Thermal Conductivity of Nanofluids	39
2.9.9	The Effect of Temperature on Thermal Conductivity of Nanofluids	41
2.10	Cooling Tower and Its Type	43
2.10.1	Types on the Basis of Heat Transfer Mode.....	44
2.10.2	Types on the Basis of Shape.....	45
2.10.3	Types on the Basis of Construction.....	45
2.10.4	Types on the Basis of Air Flow.....	46
2.10.5	Types on the Basis of Air Draft.....	46
2.10.6	Types on the Basis of Fill.....	48
2.11	Fuzzy Expert System	49

2.12	Summary	51
CHAPTER 3: METHODOLOGY		52
3.1	Mathematical Modeling.....	52
3.1.1	Cooling Range and Cooling Tower Approach.....	55
3.1.2	Heat Load Calculation.....	57
3.1.3	Water Loss and Makeup Calculation	57
3.2	Parameters Used in the Study	59
3.3	Consideration in Cooling Tower Processes	60
3.4	Functions of Cooling Tower and Associated Components	60
3.4.1	Functions of Cooling Tower	60
3.4.2	Components of Cooling Tower	61
3.5	Nanofluid Parameters Evaluation	63
3.5.1	Nanofluid Preparation Method	63
3.5.2	Nanofluid Thermal Conductivity	66
3.6	Development of Experimental Setup	71
3.6.1	Use of Nanofluids	71
3.6.2	Schematic Diagram of Cooling Tower.....	72
3.6.3	Small Scale Cooling Tower	74
3.6.4	Experimentation Process.....	78
3.7	Fuzzy Expert System Development	79
3.7.1	Basic Configuration of Fuzzy Expert System	79
3.7.2	Fuzzy Expert System Implementation.....	79
3.8	Statistical Methods for Comparison	87
CHAPTER 4: RESULTS AND DISCUSSIONS		88
4.1	Introduction	88
4.2	Data Tabulation	88
4.3	Scanning Electron Microscope (SEM) Image of Nanoparticles	89
4.4	Cooling Tower Characteristics Analysis.....	91
4.4.1	Cooling Tower Characteristics: NTU.....	93
4.4.2	Cooling Tower Characteristics: Efficiency.....	95

4.5	Thermal Performance Prediction: Fuzzy Approach	99
4.5.1	Fuzzy Evaluation by Rule Viewer	100
4.5.2	Control Surfaces of the Fuzzy Inferring System	101
4.6	Performance Prediction and Validation	104
CHAPTER 5: CONCLUSION AND RECOMMENDATION		109
5.1	Conclusion	109
5.2	Limitations	115
5.3	Recommendation	116
REFERENCES		117
APPENDICES		121
PUBLICATION LISTS.....		160
BIODATA OF THE AUTHOR		161

LIST OF TABLES

Table 3.1	:	Volume fractions for microfluids and nanofluids	66
Table 3.2	:	Expected thermal conductivity of nanofluids using Maxwell equation	68
Table 3.3	:	Expected thermal conductivity of nanofluids with Hamilton and Crosser equation	69
Table 3.4	:	Coefficients of membership functions for FIS parameter of L/G	84
Table 3.5	:	Coefficients of membership functions for FIS parameter of VC	84
Table 3.6	:	Coefficients of membership functions for FIS parameter of FR	84
Table 3.7	:	Coefficients of membership functions for FIS parameter of CE	85
Table 3.8	:	Coefficients of membership functions for FIS parameter of CR	85

LIST OF FIGURES

Figure 2.1	:	Configuration of cross flow and counter flow cooling tower...	46
Figure 2.2	:	Configuration of forced draft and induced draft fans.....	48
Figure 2.3	:	A splash fill configuration	49
Figure 3.1	:	Cooling tower process heat balance	53
Figure 3.2	:	Range and Approach in cooling tower	55
Figure 3.3	:	Flow chart of mathematical model.....	58
Figure 3.4	:	Bottled induced draft cooling tower	61
Figure 3.5	:	Variation of thermal conductivity with nanoparticles volume fraction	70
Figure 3.6	:	Nanoparticles and nanofluids preparation sample	72
Figure 3.7	:	Schematic diagram of a cooling tower	73
Figure 3.8	:	Developed experimental setup	74
Figure 3.9	:	Block diagram of water circuit	75
Figure 3.10	:	Schematic diagram of induced draft counter flow cooling tower.....	76
Figure 3.11	:	Block diagram of air circuit	76
Figure 3.12	:	Water properties measurement chart	78
Figure 3.13	:	Air properties measurement chart	78
Figure 3.14	:	Fuzzy thermal performance mod.....	80
Figure 3.15	:	Fuzzy rule editor for FIS 2	81
Figure 3.16	:	Fuzzy membership functions for (a) L/G, (b) VC, (c) FR, (d) CE, and (e) CR	83
Figure 4.1	:	SEM of nanoparticles, at x30,000 zoom	89
Figure 4.2	:	SEM of nanoparticles, at x50,000 zoom	89
Figure 4.3	:	SEM of nanoparticles, at x100,000 zoom	90
Figure 4.4	:	Particle size count from SEM	91
Figure 4.5	:	Relation between Efficiency and NTU	92
Figure 4.6	:	Relation between Efficiency and L/G	93
Figure 4.7	:	Variation of NTU with water flow rate at different volume concentrations and at different temperatures: (a) 60 °C; (b) 70 °C and (c) 80 °C	94

Figure 4.8	:	Variation of cooling efficiency with water flow rate at different volume concentrations and at temperature of 80 °C	96
Figure 4.9	:	Rule evaluation viewer.....	101
Figure 4.10	:	Graphically surface viewer for (a) CE, and (b) CR	103
Figure 4.11	:	Variation of cooling efficiency with mass flow rate ratio of liquid to air (L/G).....	105
Figure 4.12	:	Variation of cooling range with mass flow rate of liquid	105
Figure 4.13	:	Correlation between measured and predicted values of cooling efficiency.....	107
Figure 4.14	:	Correlation between measured and predicted values of cooling range	107

LIST OF ABBREVIATIONS

Al ₂ O ₃	Aluminium Oxide
ZnO	Zinc Oxide
Ti ₂ O ₃	Titanium Oxide
NTU	Number of transfer unit
FW	Fresh water
VC	Volumetric concentration
FR	Flow rate
CE	Cooling efficiency
CR	Cooling range
EG	Ethylene glycol
FES	Fuzzy expert system
ANN	Artificial neural network
ANFIS	Adaptive neuro-fuzzy inference system
HVAC	Heating, ventilation and air-conditioning
COP	Coefficient of performance
MHD	Magnetohydrodynamics
CNT	Carbon nanotube
TCNT	Treated carbon nanotube
MWNT	Multi-walled carbonnanotube
DBT	Dry-bulb temperature
WBT	Wet-bulb temperature
MF	Microfluids
NF	Nanofluids
SEM	Scanning electron microscope

LIST OF MAIN NOTATION

Symbol	Meaning
T_1	Dry Bulb Temperature of Inlet Air
T_2	Wet Bulb Temperature of Inlet Air
T_3	Dry Bulb Temperature of outlet Air
T_4	Wet Bulb Temperature of outlet Air
RH_i	Relative Humidity of Inlet Air
SH_i	Specific Humidity of Inlet Air
RH_o	Relative Humidity of Outlet Air
SH_o	Specific Humidity of Outlet Air
h_1	Enthalpy of Inlet Air
h_2	Enthalpy of outlet Air
Tw_i	Water Inlet Temperature
Tw_o	Water Outlet Temperature
m_w	Flow Rate
R_{th}	Cooling Range
R_a	Cooling Approach
η	Cooling Efficiency
Δw	Change in Specific Humidity
\dot{m}_a	Mass Flow Rate of Air
M_w	Make up Water
Q_1	Change in Heat Content Water
Q_2	Change in Heat Content Air
Q_3	Evaporation loss

l_f	Latent Heat of Evaporation of Water
K	Mass transfer coefficient
A	Contact area per unit volume
V	Active cooling volume
L	Water flow rate
h'	Enthalpy of saturated air at temperature
h	Enthalpy of air steam
G	Air flow rate