

**MODELLING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF V-BAR  
SPLASH FILLS IN WET COOLING TOWERS**

**ANKUR KUMAR TIWARI**



**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**NEW DELHI-110016, INDIA**

**JULY 2024**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

**MODELLING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF V-BAR  
SPLASH FILLS IN WET COOLING TOWERS**

by

**ANKUR KUMAR TIWARI**

Department of Mechanical Engineering

Submitted

In fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the



**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**JULY 2024**

# CERTIFICATE

---

This is to certify that the thesis entitled “**Modelling and Performance Analysis of V-bar Splash Fills in Wet Cooling Towers**” being submitted by **Mr. Ankur Kumar Tiwari** to the **Indian Institute of Technology Delhi**, New Delhi, India, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of bonafide research work carried out by him under our guidance and supervision, and the results contained in it have not been submitted in part or full to any other university or institute for award of any degree or diploma.

We also certify that Mr. Tiwari has pursued the prescribed course of research at Indian Institute of Technology Delhi.



Dr. Sanjeev Jain

Formerly Professor

Department of Mechanical Engineering,

Indian Institute of Technology Delhi,

New Delhi-110016, India

Dr. Krishnakant Agrawal

Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering,

Indian Institute of Technology Delhi,

New Delhi-110016, India

SUJAY  
KARMAKAR  
KARMAKAR

Mr. Sujay Karmakar

General Manager

National Thermal Power Corporation Limited Vindhyachal,

Madhya Pradesh-486885, India

Date: 15 July, 2024

Place: New Delhi

## ACKNOWLEDGEMENTS

---

I extend my heartfelt gratitude to my supervisor, Dr. Sanjeev Jain, whose unwavering support, mentorship, and approachability have been pivotal throughout my research journey. His positive concern for students and encouragement allowed me the freedom to explore and excel in my work. I am deeply appreciative of my co-supervisors, Dr. Krishnakant Aggrawal from IIT Delhi, and Mr. Sujay Karmakar from NTPC, for their invaluable guidance, expertise, and support. Their collective insights and collaboration significantly enriched my research experience and contributed to the successful completion of this thesis. I am also thankful to the experts from industries who collaborated with me, particularly Mr. Sujay Karmakar and his team at NTPC, whose invaluable insights and support facilitated the successful completion of our project funded by NTPC.

At IIT Delhi, I had the privilege of enrolling in numerous courses instructed by various professors. I am particularly grateful to Prof. PMV Subbarao, Prof. Prabal Talukdar, and Prof. Sangeeta Kohli for their exceptional teaching, which laid a strong technical foundation for my research.

My heartfelt appreciation goes to my friends and lab mates at the RAC Lab, IIT Delhi, especially Mr. Vinayak Sudalai and Mrs. Aditi Garg, whose camaraderie and technical discussions enriched my learning experience. I am grateful to Dr. Saurav Chakraborty, Dr. Vipul Patel, Dr. Punit Singh, Dr. Abhishek Sit, Dr. Jayakrishna, Mr. Ramendra, Mrs. Ritambhara, Dr. Mahesh, and others for their support.

I am blessed with a supportive family and friends who provided unwavering encouragement. Special thanks to my dearest wife, Dr. Anmol Dubey, my parents, and my sister, Mrs. Ankita Tiwari, for their constant support and understanding.

Above all, I express my deepest gratitude to the Supreme Being and those who provided me with spiritual guidance, which has been pivotal in shaping my life's direction.

**Ankur Kumar Tiwari**

## ABSTRACT

---

Splash fills are preferred in mechanical draft wet cooling towers commonly used in power plants because they are much less susceptible to clogging and fouling due to debris, algae, and salts compared to film fill. In cooling towers, the fill zone plays a predominant role in heat and mass transfer compared to the spray and rain zones. Consequently, having a precise understanding of the characteristics of the fill zone becomes essential. Challenges in testing v-bar splash fills, their anisotropic flow resistance, and limited numerical modelling approaches necessitate a detailed numerical model. This research evaluates v-bar splash fill's performance using three-dimensional (3-D) numerical analysis, validated against experimental data. In the numerical model, the continuous air phase has been solved using the Eulerian approach, while the stochastic gravity-driven droplet trajectory for the water phase has been predicted using the Lagrangian approach. The study also employs the Eulerian wall film (EWF) model in conjunction with the Discrete Phase Model (DPM) to forecast the formation and movement of thin liquid films on splash fills. The computational cost and time associated with the complex splash fill geometry have been reduced by geometry simplifications and judicious meshing strategies. A parametric study has also been carried out to evaluate the impact of droplet diameter and airflow rate on the thermal and hydraulic performance of the fill. It is found that increasing droplet diameter from 2 mm to 4 mm decreases the fill Merkel number by  $0.13 \text{ m}^{-1}$ , while the average fill loss coefficient reduces by  $2.2 \text{ m}^{-1}$ .

In the next part of the study, the impact of louvers on airflow distribution is investigated, aiming to optimize the angle of air intake louvers for uniform airflow beneath the fill pack. The airflow distribution within cooling towers significantly impacts their performance, and achieving uniform airflow is crucial for establishing performance correlations. Area-weighted and mass-weighted uniformity indices, along with the loss coefficient of the air inlet, are utilized to gauge airflow uniformity and performance. CFD simulations investigate cooling towers with and without louvers, assessing various louver angles including  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ , and  $70^\circ$ . Among these angles, louvers set at a  $50^\circ$  angle demonstrate the most effective enhancement in achieving relatively uniform airflow with minimal pressure drop.

To validate the numerical model, an experimental facility with v-bar splash fill is created. A  $500 \times 500 \text{ mm}^2$  counter-flow test rig features an axial fan for airflow induction and a

water distribution system for close to uniform water distribution. The facility includes instrumentation for measuring air temperatures, pressure drops, water temperatures, and flow rates. Validation of the tests depends on adhering to specified limits outlined in acceptance test code for water cooling towers, ensuring consistent test conditions. The experimental setup enables us to determine the Merkel number, including end effects, and the loss coefficient using measured quantities. It also validates the detailed numerical methodology, which now includes an induced draft configuration and more detailed geometric features compared to the previous numerical model. The detailed numerical simulation incorporates axial fan geometry for induced draft and modelled using the Multiple Reference Frame (MRF) approach. Grid independence studies is discussed, ensuring accuracy and reliability of numerical simulations. The experimental setup validates numerical predictions, showing errors below 5% across the tested range. Numerical analysis of the test-rig zones highlights the significance of the spray and rain zones, contributing approximately 17% to the overall heat and mass transfer. Migration effects in v-bar splash fills are also analyzed, revealing non-uniform water temperature distribution and recirculation zones.

Numerical correlations have been developed to calculate the fill Merkel number and fill loss coefficient as measures of the fill's thermal and hydraulic performance, respectively. These correlations, while independent of factors such as the heights of the spray zone and rain zone, results in more standardized and accurate fill characteristic curves. However, it's important to acknowledge that these factors may indirectly affect performance by influencing droplets sizes, thereby impacting the overall heat and mass transfer rate. Investigation into the impact of air and water flow rates on fill performance reveals a non-linear relationship between flow rate and performance, while hot water temperature (HWT) and wet-bulb temperature (WBT) inversely affect thermal performance, with minimal impact on airflow resistance. The method of least squares is utilized to correlate the numerically determined data, resulting in equations for  $Me_{fill}$  and  $K_{fill}$  with high  $R^2$  values of 0.984 and 0.996 respectively.

Effect of distribution of droplet sizes is studied next using a hybrid Volume of Fluid (VOF)-Discrete Phase Model (DPM) simulation and their impact on cooling tower performance under conditions of non-uniform water distribution. The methodology involves simulating the nozzle behaviour to obtain droplet size and water flow distributions, followed by an evaluation of v-bar splash fill performance using the obtained data. Experimental

validation is conducted, including a mesh independent study to ascertain model reliability. Results indicate that the droplet size distribution follows a Rosin-Rammler distribution, with a mean diameter of 1.15 mm and a spread parameter ( $n$ ) of 3. Comparison of cooling tower performance under uniform and non-uniform water distribution conditions provides insights into the impact of distribution variation. While thermal performance decreases by approximately 8.9% under non-uniform water distribution, hydraulic performance remains minimally affected. The absence of drift eliminators led to a substantial drift loss of approximately 0.58% of the total water flow rate in the test rig. Hence, the study highlights the importance of drift eliminators in mitigating drift loss, especially with small droplet sizes below 0.3 mm.

Overall, the above investigations explore challenges in testing and modelling v-bar splash fills, employing a numerical methodology validated against experimental data. Furthermore, it establishes numerical correlations for calculating fill performance and compares fill performance under conditions of non-uniform distribution.

## सार

---

यांत्रिक ड्राफ्ट वेट कूलिंग टावर्स में स्लैश फिल्स का उपयोग आमतौर पर पावर प्लांट्स में किया जाता है क्योंकि यह फिल्म फिल की तुलना में मलबे, शैवाल और लवण के कारण अवरोधन और गंदगी से बहुत कम प्रभावित होते हैं। कूलिंग टावर्स में, फिल ज़ोन हीट और मास ट्रांसफर में प्रमुख भूमिका निभाता है, जबकि स्प्रे और रेन ज़ोन की तुलना में इसकी भूमिका अधिक होती है। इसलिए, फिल ज़ोन की विशेषताओं की सटीक समझ होना आवश्यक है। वी-बार स्लैश फिल्स की परीक्षण चुनौतियाँ, उनकी एनिसोट्रोपिक फ्लो रेजिस्टेंस और सीमित संख्यात्मक मॉडलिंग दृष्टिकोणों के कारण एक विस्तृत संख्यात्मक मॉडल की आवश्यकता होती है। इस शोध में, वी-बार स्लैश फिल की प्रदर्शन का मूल्यांकन तीन-आयामी (3-डी) संख्यात्मक विश्लेषण का उपयोग करके किया गया है, जो प्रायोगिक डेटा के विरुद्ध मान्य किया गया है। संख्यात्मक मॉडल में, निरंतर वायु चरण को यूलेरियन दृष्टिकोण का उपयोग करके हल किया गया है, जबकि जल चरण के लिए स्टोकेस्टिक ग्रेविटी-चालित ड्रॉपलेट ट्रैजेक्टरी को लैंग्रेजियन दृष्टिकोण का उपयोग करके पूर्वानुमानित किया गया है। अध्ययन में, यूलेरियन वॉल फिल्म (ईडब्ल्यूएफ) मॉडल का उपयोग करके स्लैश फिल्स पर पतली तरल फिल्मों के निर्माण और गति का पूर्वानुमान करने के लिए डिस्क्रीट फेज मॉडल (डीपीएम) के साथ किया गया है। जटिल स्लैश फिल ज्यामिति से जुड़े संगणकीय लागत और समय को ज्यामिति सरलीकरण और उचित जाल निर्माण रणनीतियों द्वारा कम किया गया है। ड्रॉपलेट व्यास और वायु प्रवाह दर के थर्मल और हाइड्रोलिक प्रदर्शन पर प्रभाव का मूल्यांकन करने के लिए एक पैरामीट्रिक अध्ययन भी किया गया है। यह पाया गया कि ड्रॉपलेट व्यास को 2 मिमी से 4 मिमी तक बढ़ाने से फिल मर्केल संख्या में  $0.13 \text{ m}^{-1}$  की कमी होती है, जबकि औसत फिल लॉस गुणांक में  $2.2 \text{ m}^{-1}$  की कमी होती है।

अध्ययन के अगले भाग में, वायु प्रवाह वितरण पर लूवर के प्रभाव का अन्वेषण किया गया है, जिसका उद्देश्य फिल पैक के नीचे समान वायु प्रवाह के लिए वायु इनटेक लूवर के कोण को अनुकूलित करना है। कूलिंग टावर्स में वायु प्रवाह वितरण का प्रदर्शन पर महत्वपूर्ण प्रभाव पड़ता है, और समान वायु प्रवाह प्राप्त करना प्रदर्शन सहसंबंधों को स्थापित करने के लिए महत्वपूर्ण है। वायु प्रवाह समानता और प्रदर्शन का मापन करने के लिए क्षेत्र-भारित और द्रव्यमान-भारित समानता सूचकांक, साथ ही वायु इनलेट का लॉस गुणांक का उपयोग किया गया है। सीएफडी सिमुलेशन विभिन्न लूवर कोणों सहित लूवर के साथ और बिना कूलिंग टावर्स का अन्वेषण करता है, जिसमें  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ , और  $70^\circ$  शामिल हैं। इन कोणों में,  $50^\circ$

के कोण पर सेट लूवर अपेक्षाकृत समान वायु प्रवाह को न्यूनतम दबाव ड्रॉप के साथ प्राप्त करने में सबसे प्रभावी सुधार दर्शाते हैं।

संख्यात्मक मॉडल को मान्य करने के लिए, वी-बार स्प्लैश फिल के साथ एक प्रायोगिक सुविधा बनाई गई है। 500×500 mm<sup>2</sup> काउंटर-फ्लो टेस्ट रिग में वायु प्रवाह प्रेरण के लिए एक अक्षीय पंखा और लगभग समान जल वितरण के लिए एक जल वितरण प्रणाली है। इस सुविधा में वायु तापमान, दबाव ड्रॉप, जल तापमान, और प्रवाह दरों को मापने के लिए उपकरण शामिल हैं। परीक्षणों की मान्यता जल कूलिंग टावर्स के लिए स्वीकृति परीक्षण कोड में उल्लिखित निर्दिष्ट सीमाओं का पालन करने पर निर्भर करती है, जो लगातार परीक्षण स्थितियों को सुनिश्चित करती है। प्रायोगिक सेटअप हमें मापी गई मात्राओं का उपयोग करके मर्केल संख्या और लॉस गुणांक को निर्धारित करने में सक्षम बनाता है। यह विस्तृत संख्यात्मक कार्यप्रणाली को भी मान्य करता है, जिसमें अब एक प्रेरित ड्राफ्ट कॉन्फिगरेशन और पिछले संख्यात्मक मॉडल की तुलना में अधिक विस्तृत ज्यामितीय विशेषताएं शामिल हैं। विस्तृत संख्यात्मक सिमुलेशन प्रेरित ड्राफ्ट के लिए अक्षीय पंखे की ज्यामिति को शामिल करता है और इसे मल्टीपल रेफरेंस फ्रेम (एमआरएफ) दृष्टिकोण का उपयोग करके मॉडल किया गया है। जाल स्वतंत्रता अध्ययन पर चर्चा की गई है, जो संख्यात्मक सिमुलेशन की सटीकता और विश्वसनीयता को सुनिश्चित करता है। प्रायोगिक सेटअप संख्यात्मक पूर्वानुमानों को मान्य करता है, जो परीक्षण किए गए रेंज में 5% से कम त्रुटियों को दर्शाता है। टेस्ट-रिग जोनों का संख्यात्मक विश्लेषण स्प्रे और रेन जोनों के महत्व को उजागर करता है, जो कुल हीट और मास ट्रांसफर में लगभग 17% योगदान करते हैं। वी-बार स्प्लैश फिल्स में माइग्रेसन प्रभावों का भी विश्लेषण किया गया है, जिसमें असमान जल तापमान वितरण और पुनरावर्तन जोन सामने आए हैं।

संख्यात्मक सहसंबंधों को फिल मर्केल संख्या और फिल लॉस गुणांक की गणना के लिए विकसित किया गया है, जो क्रमशः फिल के थर्मल और हाइड्रोलिक प्रदर्शन के उपाय हैं। ये सहसंबंध, स्प्रे जोन और रेन जोन की ऊंचाइयों जैसे कारकों से स्वतंत्र होते हुए, अधिक मानकीकृत और सटीक फिल विशेषता वक्रों के परिणामस्वरूप होते हैं। हालांकि, यह स्वीकार करना महत्वपूर्ण है कि ये कारक ड्रॉपलेट आकारों को प्रभावित करके प्रदर्शन को अप्रत्यक्ष रूप से प्रभावित कर सकते हैं, जिससे कुल हीट और मास ट्रांसफर दर पर प्रभाव पड़ता है।

वायु और जल प्रवाह दरों के फिल प्रदर्शन पर प्रभाव की जांच से प्रवाह दर और प्रदर्शन के बीच गैर-रैखिक संबंध का पता चलता है, जबकि गर्म पानी का तापमान (एचडब्ल्यूटी) और गीला बल्ब तापमान

(डब्ल्यूबीटी) थर्मल प्रदर्शन को प्रतिकूल रूप से प्रभावित करते हैं, जबकि वायु प्रवाह प्रतिरोध पर न्यूनतम प्रभाव पड़ता है। न्यूनतम वर्गों की विधि का उपयोग संख्यात्मक रूप से निर्धारित डेटा को सहसंबंधित करने के लिए किया गया है, जिसके परिणामस्वरूप MeFill और Kfill के लिए उच्च  $R^2$  मानों के साथ समीकरण प्राप्त हुए हैं, जो क्रमशः 0.984 और 0.996 हैं।

ड्रॉपलेट आकार के वितरण का प्रभाव असमान जल वितरण की स्थितियों के तहत कूलिंग टावर प्रदर्शन पर उनके प्रभाव का अध्ययन करने के लिए वॉल्यूम ऑफ फ्लुइड (वीओएफ)-डिस्क्रीट फेज मॉडल (डीपीएम) सिमुलेशन का उपयोग करके किया गया है। कार्यप्रणाली में ड्रॉपलेट आकार और जल प्रवाह वितरण प्राप्त करने के लिए नोजल व्यवहार का अनुकरण करना शामिल है, इसके बाद प्राप्त डेटा का उपयोग करके वी-बार स्लैश फिल प्रदर्शन का मूल्यांकन किया गया है। प्रायोगिक मान्यता की गई है, जिसमें मॉडल विश्वसनीयता सुनिश्चित करने के लिए एक जल स्वतंत्रता अध्ययन शामिल है। परिणाम इंगित करते हैं कि ड्रॉपलेट आकार वितरण एक रोज़िन-रैमलर वितरण का अनुसरण करता है, जिसका औसत व्यास 1.15 मिमी और फैलाव पैरामीटर ( $n$ ) 3 है। समान और असमान जल वितरण की स्थितियों के तहत कूलिंग टावर प्रदर्शन की तुलना वितरण भिन्नता के प्रभाव में अंतर्दृष्टि प्रदान करती है। जबकि असमान जल वितरण के तहत थर्मल प्रदर्शन में लगभग 8.9% की कमी होती है, हाइड्रोलिक प्रदर्शन पर न्यूनतम प्रभाव पड़ता है। टेस्ट रिग में लगभग 0.58% कुल जल प्रवाह दर का एक महत्वपूर्ण ड्रिफ्ट लॉस हुआ। इसलिए, अध्ययन छोटे ड्रॉपलेट आकारों के साथ ड्रिफ्ट लॉस को कम करने में ड्रिफ्ट एलिमिनेटर्स के महत्व को उजागर करता है।

कुल मिलाकर, उपरोक्त जांच वी-बार स्लैश फिल्स के परीक्षण और मॉडलिंग में चुनौतियों का पता लगाती है, एक संख्यात्मक कार्यप्रणाली का उपयोग करती है जो प्रायोगिक डेटा के विरुद्ध मान्य होती है। इसके अलावा, यह फिल प्रदर्शन की गणना के लिए संख्यात्मक सहसंबंध स्थापित करती है और असमान वितरण की स्थितियों के तहत फिल प्रदर्शन की तुलना करती है।

# CONTENTS

CERTIFICATE .....	i
ACKNOWLEDGEMENTS .....	ii
ABSTRACT.....	iii
संर.....	vi
CONTENTS.....	ix
LIST OF FIGURES .....	xiii
LIST OF TABLES .....	xvii
NOMENCLATURE .....	xviii
CHAPTER 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Overview of wet cooling towers .....	1
1.2 Classification of wet cooling towers .....	3
1.3 Types of fill media .....	5
1.4 Fill performance parameters.....	7
1.5 Nature of splash fill and necessity of numerical model for v-bar splash fill .....	9
1.6 Thesis layout .....	9
CHAPTER 2 LITERATURE REVIEW.....	11
2.1 Mathematical modelling.....	11

2.2	Experimental studies .....	15
2.3	Numerical studies .....	29
2.4	Research gaps in literature .....	31
2.5	Objectives of present research.....	32
CHAPTER 3 NUMERICAL METHODOLOGY .....		34
3.1	Modeling multiphase flows and turbulence in cooling tower systems .....	34
3.2	Governing equations .....	38
3.2.1	Continuous air phase.....	38
3.2.2	Discrete water phase .....	41
3.2.3	Eulerian wall film model .....	44
3.2.4	Volume of fluid (VOF) model .....	50
CHAPTER 4 COMPUTATIONAL MODELLING AND ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL V-BAR SPLASH FILL .....		53
4.1	Computational geometry and meshing strategy .....	53
4.2	Boundary conditions and solver settings.....	55
4.3	Sensitivity analysis and validation .....	57
4.4	Contour analysis and interpretations .....	58
4.5	Effect of operating parameters .....	61
4.6	Impact of louvers on airflow distribution in cooling towers.....	64
4.6.1	Results and discussion .....	66

CHAPTER 5	DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL FACILITY AND NUMERICAL VALIDATION.....	71
5.1	Counterflow v-bar splash fill performance test facility .....	71
5.2	Details of measurements .....	74
5.2.1	Inlet and outlet air temperature .....	74
5.2.2	Hot and cold water temperature .....	76
5.2.3	Water and air flow rate .....	78
5.2.4	Pressure drop across fill .....	81
5.2.5	Data acquisition and processing.....	82
5.3	Spray frame water distribution and air velocity profile .....	83
5.4	Experimental data analysis.....	85
5.5	Validation of numerical methodology.....	88
5.5.1	Boundary condition.....	89
5.5.2	Grid independence and validation .....	90
5.5.3	Analyzing the impact of cooling tower zones on performance and water migration.....	93
CHAPTER 6	CORRELATIONS FOR THE PERFORMANCE OF V-BAR SPLASH FILL.....	97
6.1	Parametric study.....	97
6.1.1	Effect of water and air flow rates on fill performance.....	98
6.1.2	Effect of hot water temperature and WBT .....	100

6.2	Determining best fit non-linear model .....	102
CHAPTER 7 PERFORMANCE WITH NON-UNIFORM WATER DISTRIBUTION ...		106
7.1	Nozzle simulation using hybrid vof-dpm model.....	106
7.1.1	Nozzle geometry and meshing.....	108
7.1.2	Validation and mesh independence study.....	110
7.2	Cumulative size distribution of droplets just above the fill .....	113
7.3	Comparison of cooling tower performance under non-uniform water distribution	118
CHAPTER 8 CONCLUSIONS AND SCOPE FOR FUTURE RESEARCH .....		121
8.1	Conclusions .....	121
8.1.1	Numerical methodology for v-bar splash fill.....	121
8.1.2	Impact of louvers on airflow distribution in cooling tower .....	122
8.1.3	Development of experimental setup .....	122
8.1.4	Improved correlation for the thermal and hydraulic performance of v-bar splash fill without end effects .....	123
8.1.5	Incorporation of non-uniform water distribution in the numerical analysis. ...	123
8.2	Scope for future research.....	124
References.....		125
LIST OF PUBLICATIONS .....		132
BRIEF BIODATA OF THE AUTHOR.....		133

# LIST OF FIGURES

Figure 1.1 Mechanical draft cooling tower (source: Cooling Tower Fundamentals (2009), 2nd edison, p. 43, SPX Cooling Technologies, Inc., Kansas, USA) .....	2
Figure 1.2 Induced draft counter flow cooling tower (Source: <a href="https://www.thermopedia.com/content/663/">https://www.thermopedia.com/content/663/</a> , from article by Singham, J.R., DOI: 10.1615/AtoZ.c.cooling_towers.) .....	3
Figure 1.3 Broad classification of cooling towers .....	4
Figure 1.4 Counterflow and crossflow cooling towers (Source: <a href="https://spxcooling.com/wp-content/uploads/AE-SK-18.pdf">https://spxcooling.com/wp-content/uploads/AE-SK-18.pdf</a> ) .....	5
Figure 1.5 Film fill (Source: Bertrand [4]) .....	6
Figure 1.6 Splash fills (Source: Bertrand [4]).....	7
Figure 3.1 Flow chart illustrating coupling between continuous and discrete phase calculations .....	36
Figure 3.2 Mechanism of splashing, momentum, heat and mass transfer for the wall-film....	45
Figure 3.3 Wall interaction criterion.....	47
Figure 3.4 Criteria for water film separation from fill wall.....	49
Figure 4.1 General view of the current numerical domain and boundary conditions.....	53
Figure 4.2 Numerical domain showing planes at the top and bottom of the v-bar splash fill .	54
Figure 4.3 V-bar splash fill geometry (a) Fill with thickness, (b) Fill imprint .....	54
Figure 4.4 Validation of the current numerical model against the experimental data [4] in terms of (a) fill loss coefficient (b) fill Merkel number .....	58
Figure 4.5 Contour plots for static pressure.....	59

Figure 4.6 Contour plots for air density.....	59
Figure 4.7 Contour plots for velocity.....	60
Figure 4.8 Contour plots for air temperature .....	60
Figure 4.9 Contour plots for mass fraction of H <sub>2</sub> O.....	61
Figure 4.10 Temperature distribution of water parcels in domain.....	61
Figure 4.11 Effect of droplet diameter on the (a) fill Merkel number per meter fill (b) fill loss coefficient per meter fill at reference conditions .....	63
Figure 4.12 Cooling tower geometry with louvers .....	64
Figure 4.13 Cooling tower (a) without louvers (b) with louvers .....	65
Figure 4.14 Cartesian coordinate system with x, y, and z axes .....	67
Figure 4.15 Velocity distribution without air inlet louvers.....	68
Figure 4.16 Velocity distribution with air inlet louvers.....	69
Figure 4.17 Velocity variation with z-position at the bottom of fill pack .....	70
Figure 5.1 Schematic of the test facility .....	72
Figure 5.2 Hot water tank with electric heaters and RTD sensor .....	73
Figure 5.3 Control panel with electric meter and temperature controller.....	74
Figure 5.4 Hot water pipe insulation.....	74
Figure 5.5 Inlet air DBT and WBT sensors .....	75
Figure 5.6 Air DBT and WBT measurements at the outlet .....	76
Figure 5.7 Hot water temperature sensor .....	77

Figure 5.8 Cold water temperature sensors on one side .....	78
Figure 5.9 Turbine type water flow rate sensor .....	79
Figure 5.10 Variable frequency drive to control airflow rate .....	80
Figure 5.11 Airflow measurement .....	80
Figure 5.12 Pressure taps and silicon pipe.....	81
Figure 5.13 Data logger .....	82
Figure 5.14 Cross-fluted fill performance as a function of Christiansen coefficient [67].....	83
Figure 5.15 Set-up used to determine water distribution.....	84
Figure 5.16 Variation of average of measured quantities over time.....	87
Figure 5.17 Constancy of test conditions.....	88
Figure 5.18 Computational domain for the test-rig .....	89
Figure 5.19 Planes in the numerical domain.....	92
Figure 5.20 Validation of numerical model with the experimental data .....	92
Figure 5.21 Variation of zone wise thermal characteristics in the test rig with L/G .....	94
Figure 5.22 Temperature distribution of water vs water mass flow rate at the fill pack top ...	94
Figure 5.23 Temperature distribution of water vs water mass flow rate at the fill pack bottom .....	95
Figure 5.24 Temperature distribution of water vs water mass flow rate at the cold water basin .....	95
Figure 5.25 Velocity contours in the planes at the top and bottom of the fills.....	96

Figure 6.1 Contours of Merkel number varying with L and G .....	99
Figure 6.2 Contours of loss coefficient varying with L and G .....	100
Figure 6.3 Merkel number varying with HWT and WBT .....	101
Figure 6.4 Loss coefficient varying with HWT and WBT .....	102
Figure 6.5 Non-linear relationship with the predictors .....	103
Figure 6.6 Correlation comparison plots .....	105
Figure 7.1 Jet breakup regimes (Source: Menon S, & Ranjan R. (2016). Coarse Grained Simulation and Turbulent Mixing. Cambridge University Press, 351-392.).....	107
Figure 7.2 (a) Nozzle (b) Nozzle with black background.....	108
Figure 7.3 Nozzle domain.....	109
Figure 7.4 Poly-hexcore mesh .....	110
Figure 7.5 Dynamic mesh adaption .....	110
Figure 7.6 Nozzle water spray .....	111
Figure 7.7 Nozzle water spray (8-bit threshold image) .....	112
Figure 7.8 Spray formation process .....	114
Figure 7.9 Conversion of water lumps into droplets.....	115
Figure 7.10 Droplet size distribution .....	116
Figure 7.11 Cumulative size distribution of droplets.....	117
Figure 7.12 Rosin-Rammler curve fit for the droplet size data .....	117
Figure 7.13 Droplet sizes in the domain .....	119

## LIST OF TABLES

Table 2.1 Summary of correlations and their applicability.....	16
Table 2.2 Coefficients employed in developing correlations for various performance parameters specific to each packing (fill) [36] .....	27
Table 3.1 Turbulence model constants .....	40
Table 3.2 Morsi and Alexander drag coefficient correlation constants.....	42
Table 4.1 Grid dependence study for hydraulic performance.....	55
Table 4.2 Grid dependence study for thermal performance .....	55
Table 4.3 Input parameters for the contours plots .....	58
Table 4.4 Performance parameters .....	69
Table 5.1 Measured quantities at average $L/G=1.29$ .....	86
Table 5.2 Calculated quantities at average $L/G=1.29$ .....	86
Table 5.3 Grid sizes utilized for assessing grid independence .....	91
Table 5.4 Numerically obtained water temperature at different planes.....	93
Table 6.1 Design and operating parameters.....	98
Table 7.1 Mesh independence study.....	113
Table 7.2 Mass fraction with diameter greater than $d$ .....	116

## NOMENCLATURE

Symbols	Description	Unit
A	Area	$m^2$
a	Pack density, surface area per unit volume	$m^{-1}$
c	Constant, or coefficient	
C	Molar mass	g/mol
$C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	Standard k- $\epsilon$ turbulent model constants	
$C_D$	Drag coefficient	
$c_p$	Specific heat at constant pressure	J/kg.K
D	Diameter	m
$\bar{D}$	Average droplet diameter	$\mu m$
$\bar{D}_v$	Differential advection term	
$d_{eq}$	Equivalent diameter for structured packing	m
$D_v, D_f$	Diffusion coefficient	$m^2/s$
e	Effectiveness	
E	Internal energy	J/kg
$F_D$	Drag force	N
G	Mass flux or flow rate of air	$kg/m^2.s$
g	Gravitational acceleration	$m/s^2$
$G_k$	Production of turbulent kinetic energy	
h	Heat transfer coefficient	$W/m^2.K$
H	Height of droplets fall	m
$h_d$	Mass transfer coefficient	$kg/m^2.s$
$h_f$	Film thickness	m
$h_{fg}$	Latent heat of water vaporization	J/kg
i	Enthalpy	J/kg
i, j	Cartesian coordinate directions or phases	
K	Loss coefficient	
k	Turbulent kinetic energy	$m^2/s^2$
$K_x$	Mass transfer coefficient	$kW/m^2.K$

$L$	Flow rate of water	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
$Le_f$	Lewis factor	
$M$	Droplet mass	$\text{kg}$
$\dot{m}$	Mass flow rate	$\text{kg/s}$
$\dot{m}_s$	Mass source per unit wall area	
$\dot{m}_{\text{vap}}$	Mass vaporization rate	$\text{kg/s}$
$Me$	Merkel number	
$n$	slope	
$Nu$	Nusselt number	
$P$	Pressure	$\text{N/m}^2$
$Pr_t$	Turbulent Prandtl number	
$\dot{q}_{\text{imp}}$	Source term of heat	$\text{W/m}^3$
$q_w$	Water flow rate	$\text{m}^3/\text{h}$
$Re$	Reynold's number	
$S_E$	Source term of energy	$\text{W/m}^3$
$S_F$	Source term of momentum	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$
$S_M$	Source term of mass	$\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$
$Sc_t$	Turbulent Schmidt number	
$SN$	Stage number of packing	
$T$	Temperature	$^{\circ}\text{C}$ or $\text{K}$
$T_{\infty}$	ambient temperature of continuous phase at domain inlet	$\text{K}$
$T_f$	Average film temperature	$^{\circ}\text{C}$ or $\text{K}$
$T_m$	Film half depth temperature	$^{\circ}\text{C}$ or $\text{K}$
$T_s$	Film surface temperature	$^{\circ}\text{C}$ or $\text{K}$
$T_w$	Film wall temperature	$^{\circ}\text{C}$ or $\text{K}$
$v$	Velocity	$\text{m/s}$
$V$	Fill volume	$\text{m}^3$
$V_l$	Mean film velocity	$\text{m/s}$
$w$	Humidity ratio	$\text{kg/kg dry air}$
$We$	Weber number	
$Y$	Mass fraction of a species	

Z	Packing thickness	m
---	-------------------	---

### Subscripts

a	Air	
fd	Frictional and drag effect	
fi or fill	Fill	
fr	Frontal	
i	inlet	
m	Mean or moist	
o	Outlet	
p	Particle (water droplet)	
s	saturation	
total	All zones (spray, fill and rain zones)	
v	Vapour	
wb	Wet bulb	
x	Coordinate	
y	Coordinate	
z	Coordinate	
adb	Air dry bulb	
op	Operating	
ref	Reference point, considered to be at 10 m above ground level	

### Greek Symbols

$\Delta$	Differential	
$\mu$	Dynamic viscosity	kg/m.s
$\rho$	Density	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Surface tension	N/m
$\alpha$	Volume fraction	
$\gamma_a$	Area weighted uniformity index	
$\gamma_m$	Mass weighted uniformity index	
$\alpha^*$	Volumetric heat transfer coefficient	W/m <sup>3</sup> .K

$\eta$	Efficiency	
$\varepsilon$	Turbulent dissipation rate	$\text{m}^2/\text{s}^3$
$\mu$	Dynamic viscosity	$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$
$\mu_t$	Turbulent dynamic viscosity	$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$
$\omega$	Specific rate of dissipation	$\text{m}^2/\text{s}^3$
$\varphi$	Viscous dissipation	$\text{W}/\text{m}^3$
$\tau_{ij}$	Mean stress tensor	$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
$\delta_{ij}$	Mean strain tensor	$\text{s}^{-1}$
$\nu$	Kinematic viscosity	$\text{m}^2/\text{s}$

<b>Acronym</b>	<b>Description</b>
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant Friedrichs Lewy
CWT	Cold Water Temperature
DPM	Discrete Phase Model
EFW	Eulerian Wall Film
GRG	Generalized Reduced Gradient
HCP	Horizontal Corrugated Packing
HVAC	Heating , Ventilation and Air Conditioning
HWT	Hot Water Temperature
IDCT	Induced Draft Cooling Tower
LP	Linear Programming
MDWCT	Mechanical Draft Wet Cooling Towers
MRF	Multiple Reference Frame
NB	Nominal Bore
NDWCT	Natural Draft Wet Cooling Towers
NTU	Number of Transfer Units
PID	Proportional Integral Derivative
PISO	Pressure Implicit With Splitting Of Operators
PVC	Polyvinyl Chloride
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RNG	Renormalization Group

RTD	Resistance Temperature Detector
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	SIMPLE Consistent
TDS	Total Dissolved Solids
VCP	Vertical Corrugated Packing
VOF	Volume Of Fluid
WBT	Wet Bulb Temperature