

**CFD-assisted Characterization and Design of
Hot Water Seasonal Heat Stores**

Treatise approved by Faculty of Mechanical Engineering,
University of Stuttgart to award the degree of Doctor of
Engineering (Dr.-Ing.)

Submitted by

Varghese Panthaloookaran

From Pushpagiri, India

First Examiner: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen

Second Examiner: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Laurien

Date of Oral Examination: 16. February, 2007

Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW)

2007

Abstract

Panthalookaran, Varghese:

CFD-Assisted Characterization and Design of Hot Water Seasonal Heat Stores

Due to the enormity of the spatio-temporal scales associated with hot water seasonal heat stores (HWSHS) it is desirable to have a tool based on computational fluid dynamics (CFD) that simplifies the design and characterization of new generation systems. Two necessary components of such a design tool are 1) a comprehensive characterization scheme that compares the performance of different systems and 2) a validated CFD model that simulates different fluid dynamic and heat transfer processes taking place within such systems. The current thesis develops a characterization scheme for a general stratified thermal energy store (TES) integrating the First and the Second Law (of Thermodynamics) concerns. Two turbulence models, namely “realizable” and renormalization group (RNG) theory based k - ϵ models available in a commercial CFD code, Fluent 6.1.18, are calibrated for the special type of stratified and turbulent flows encountered in HWSHS (by adjusting the coefficients of the turbulence models). These calibrated turbulence models are then validated against measurement databases from typical HWSHS situated in Friedrichshafen-Wiggenhausen and Hannover-Kronsberg, both in Germany, and against suitable laboratory-scale experiments. The validated CFD models together with the new TES characterization scheme constitute the new design tool for HWSHS. This design tool is further implemented to investigate the effects of different design parameters associated with HWSHS, such as the shape, the size, and the structure of containment, the internal structure, and the shape of diffusers and flow-guides on their efficiency. The results suggest that the CFD-assisted characterization and the design tool developed here is efficient to derive valuable design information.

Kurzfassung

Panthalookaran, Varghese:

CFD-unterstützte Charakterisierung und Auslegung von saisonalen Heißwasser-Wärmespeichern

Die Charakterisierung und das Design saisonaler Heißwasser-Wärmespeicher (HWSHS) aufgrund der großen geometrischen Abmessungen und langen Betriebszeiten aufwändig, zeitkostenintensiv. Daher ist ein auf numerischen Strömungssimulationen (CFD) basierendes Werkzeug hilfreich, um die Charakterisierung und Auslegung von neuen Speichersystemen zu vereinfachen. Zwei notwendige Komponenten eines solchen Designwerkzeuges sind: 1) ein umfassendes Schema um die Leistung verschiedener Systeme miteinander zu vergleichen und 2) ein validiertes CFD-Modell, das verschiedene fluiddynamische Abläufe und Prozesse des Wärmeübergangs, welche in solchen Systemen stattfinden, simuliert. In der vorliegenden Arbeit wird ein Charakterisierungsschema für thermische Schichtspeicher (TES) entwickelt unter Berücksichtigung des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Zwei in dem kommerziellen CFD-Programm Fluent enthaltene k - ϵ -Turbulenzmodelle („realizable“ und auf der Renormalization Group Theorie basierende k - ϵ -Turbulenzmodelle) werden für die besonderen Typen von Schichtungs- und Turbulenzströmungen, die in HWSHS auftreten, kalibriert. Dies erfolgt durch die Anpassung der Turbulenzkoeffizienten. Zur Validierung der kalibrierten Turbulenzmodelle werden Messdaten der vermessenen Nahwärmeversorgungsanlagen mit HWSHS in Friedrichshafen, Wigganhausen und Hannover-Kronsberg, sowie Messdaten aus Experimenten, welche im Labormaßstab durchgeführt wurden, verwendet. Zusammen mit dem neu entwickelten Charakterisierungsschema bilden diese validierten CFD-Modelle das neue Designwerkzeug für HWSHS. Dieses Werkzeug wird eingesetzt, um die Einflüsse verschiedener für HWSHS geeigneter Designparameter - wie z. B. die Behälterhülle, deren Größe, Form und Aufbau, die interne Struktur und die Gestalt der Be- und Entladeeinbauten - auf deren jeweilige Effizienz zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass das entwickelte CFD-unterstützte Charakterisierungs- und Designwerkzeug nützliche und verlässliche Auslegungsinformationen ermöglicht.

Contents

Abstract.....	VII
Kurzfassung.....	VIII
Nomenclature	XI
1 Introduction and Goal-setting	1
2 Characterization of Stratified Thermal Energy Storages.....	5
2.1 Historical Perspective	5
2.2 A New Method of TES Characterization.....	8
2.2.1 The Outlook	8
2.2.2 Entropy Generation Ratio (R_{EG})	9
2.2.3 Energy Response Factor (E_R)	12
2.2.4 Definition of TES Efficiencies	13
2.2.5 Characterization of TES	14
3 Salient Features of Stratified Turbulence.....	15
3.1 Dimensionless Numbers	16
3.2 Anisotropy of Turbulence	18
3.3 Interfacial Instabilities and Internal Gravity Waves	19
3.4 Eddy Diffusivity and Turbulent Prandtl Numbers.....	21
3.5 Stratified Outflows.....	21
3.6 Stratified Inflows.....	22
3.7 Stratified Plumes	24
4 CFD Models for Stratified Hot Water Heat Stores	25
4.1 Elements of Eddy-Viscosity-Based Turbulence Modeling.....	27
4.1.1 The Standard k- ϵ Model	28
4.1.2 RNG k- ϵ Model	30
4.1.3 Realizable k- ϵ Model.....	34
4.2 Calibration of Turbulence Models	37
4.2.1 Benchmark Experiments.....	39
4.2.2 Development of CFD Models.....	42
4.2.3 Calibration of RNG k- ϵ Model	45
4.2.4 Calibration of Realizable k- ϵ Model.....	48

4.2.5	Comparison of Calibrated RNG and Realizable k- ϵ Models	
4.3	Validation of the CFD Models.....	
4.3.1	Validation against Charging-discharging Processes of the FW HWSHS.....	
4.3.2	Validation against Charging Process of the HK HWSHS	
4.3.3	Validation against Laboratory Experiments on the Storing Process.....	
5	Effects of Containment Shape and Size on the SEN Efficiency of HWSHS.....	
5.1	Aspect Ratio.....	
5.2	Containment Shape	
5.3	Internal Structure.....	
5.4	Containment Size	
6	Effects of Containment Structures on the SEN Efficiency of HWSHS.....	
6.1	Wall Material	
6.2	Wall Thickness.....	
6.3	Different Modes of Insulation Application.....	
6.4	Differential Application of External Insulation	
6.5	Top Boundary Design	
7	Effects of Diffusers and Flow-guides on the SEN Efficiency of HWSHS	
7.1	Operating Condition 1: Constant Enthalpy Inflow	
7.1.1	Conical Diffusers.....	
7.1.2	Radial Diffusers.....	
7.1.3	Flow-Guides	
7.2	Operating Condition 2: Variable Enthalpy Inflow.....	10
8	Summary.....	10
	References.....	11
	Appendix 1: RANS and Turbulence Model Equations in Cylindrical Coordinates.....	12
	Appendix 2: Grid Convergence Analysis.....	12
	Appendix 3: $Pr_{t,E}$ Correlations	13
	Appendix 4: Penetration Depth of Downward Buoyant Hot Water Jets.....	13
	Appendix 5: Moller's Radial Diffuser Configuration.....	13