

INTISARI

PEMODELAN ALIRAN DUA FASA SELAMA PROSES PERPINDAHAN KALOR PENDIDIHAN PADA CELAH SEMPIT REKTANGULAR UNTUK KASUS KECELAKAAN TMI-2

Oleh

Nur Rahmad Yusuf
18/435405/SPA/00643

Menjaga keselamatan reaktor nuklir menuntut adanya inovasi berkelanjutan dalam pemodelan prediktif dan desain reaktor, terutama setelah pelajaran dari kecelakaan parah seperti lelehan *core* reaktor TMI-2. Observasi langsung terhadap fenomena aliran dua fasa di bagian *lower plenum* pada bejana tekan reaktor (RPV) tidak memungkinkan, sehingga diperlukan model komputasi yang andal untuk menyimulasikan fenomena aliran krusial di bawah kondisi kecelakaan parah. Pendekatan yang ada saat ini masih terbatas oleh kompleksitas alami aliran dua fasa, tantangan dalam penyelesaian persamaan matematis, serta belum optimalnya teknik validasi terintegrasi.

Penelitian ini menjawab tantangan tersebut dengan mengembangkan model simulasi meshless berbasis MATLAB yang memanfaatkan metode *Radial Basis Function* (RBF) semi-implisit dan persamaan Cahn–Hilliard untuk menyimulasikan dinamika aliran dua fasa—khususnya evolusi antarmuka, distribusi tekanan, dan transisi pola aliran—pada celah sempit berbentuk rektangular yang merepresentasikan geometri *lower plenum* RPV. Model ini divalidasi secara komprehensif menggunakan data eksperimen, dengan memanfaatkan teknik pemrosesan citra untuk menganalisis ribuan frame video berkecepatan tinggi yang merekam pola aliran dua fasa nyata.

Evaluasi kuantitatif menggunakan metrik statistik yang diakui luas menunjukkan tingkat akurasi model yang tinggi: pada saluran 3 mm, nilai *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) masing-masing sebesar 13,69 piksel, 12,04 piksel, dan 11,84%; sedangkan pada saluran 4 mm, nilai yang diperoleh adalah 13,15 piksel, 11,19 piksel, dan 10,95%. Nilai error yang konsisten rendah ini membuktikan bahwa model mampu mereplikasi hasil eksperimen dengan baik dan menangkap dinamika utama aliran dua fasa secara akurat.

Secara teoretis, penelitian ini memperkaya pemodelan aliran dua fasa pada geometri celah sempit dalam skenario kecelakaan berat. Secara metodologis, penelitian ini membangun kerangka validasi eksperimental-numerik yang objektif berbasis citra. Secara praktis dan industri, hasil penelitian mendukung peningkatan analisis keselamatan, desain sistem reaktor, serta strategi mitigasi risiko, dan dapat

diadaptasi untuk sistem rekayasa lain yang membutuhkan prediksi akurat terhadap aliran dua fasa dan perilaku antarmuka.

Kata kunci: *Nuclear Reactor Safety*, Aliran dua fasa, Celah Sempit *Rectangular Channels*, Model matematika, Komputasi *Meshless*, MATLAB, *Image Processing*, RMSE,

ABSTRACT

MODELING 2 PHASE FLOW DURING THE PROCESS OF BOILING HEAT TRANSFER IN RECTANGULAR CHANNELS in NARROW GAP for TMI-2 ACCIDENT CASES

By

Nur Rahmad Yusuf
18/435405/SPA/00643

Ensuring the safety of nuclear reactors demands ongoing advancements in predictive modeling and reactor design, especially in light of lessons learned from severe incidents such as the TMI-2 core meltdown. Direct observation of two-phase flow within reactor pressure vessel (RPV) lower plenums is not feasible, necessitating robust computational models that can accurately simulate critical flow phenomena under extreme accident conditions. Existing approaches are limited by the inherent complexity of two-phase flow dynamics, the challenges of solving governing equations, and the lack of rigorous, integrated validation techniques.

This study addresses these challenges by developing a novel, MATLAB-based meshless simulation model utilizing a semi-implicit Radial Basis Function (RBF) method and the Cahn–Hilliard equation to simulate two-phase flow dynamics—specifically interface evolution, pressure distribution, and flow regime transitions—in narrow rectangular gaps representative of RPV lower plenum geometries. The model is comprehensively validated through experimental data, employing advanced image processing techniques to analyze thousands of high-speed video frames capturing real two-phase flow patterns.

Quantitative evaluation using widely recognized statistical metrics demonstrates the model’s accuracy: for the 3 mm channel, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) were 13.69 pixels, 12.04 pixels, and 11.84%, respectively; for the 4 mm channel, corresponding values were 13.15 pixels, 11.19 pixels, and 10.95%. These consistently low error metrics provide robust evidence that the model closely replicates experimental observations, effectively capturing the essential dynamics of two-phase flow.

Theoretically, this research advances the modeling of two-phase flow in narrow-gap geometries under severe accident conditions. Methodologically, it establishes a validated, objective framework for experimental-numerical comparison using image-based analysis. Practically and industrially, the outcomes support improved safety analysis, reactor design, and risk mitigation strategies, with adaptability to other engineering systems where accurate prediction of two-phase flow and interface behavior is critical.

Keywords : Nuclear Reactor Safety, Two-Phase Flow, Narrow Gap Rectangular Channels, Mathematical Modelling, Meshless Computation, MATLAB, Image Processing, RMSE.