

**Politechnika
Warszawska**

New Best-Estimate model for dryout prediction at BWR operating conditions

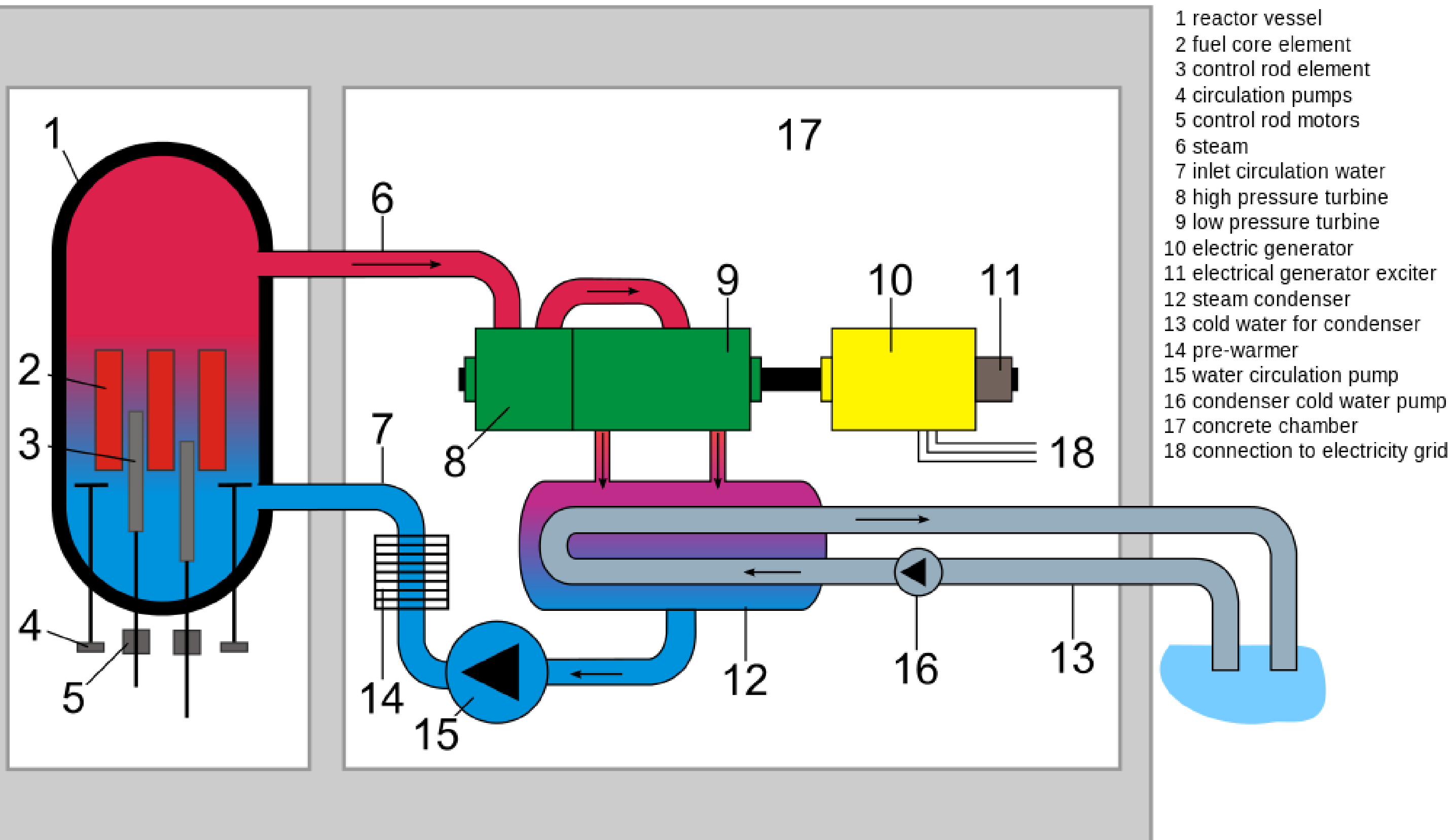
Mgr inż. Michał Spirzewski



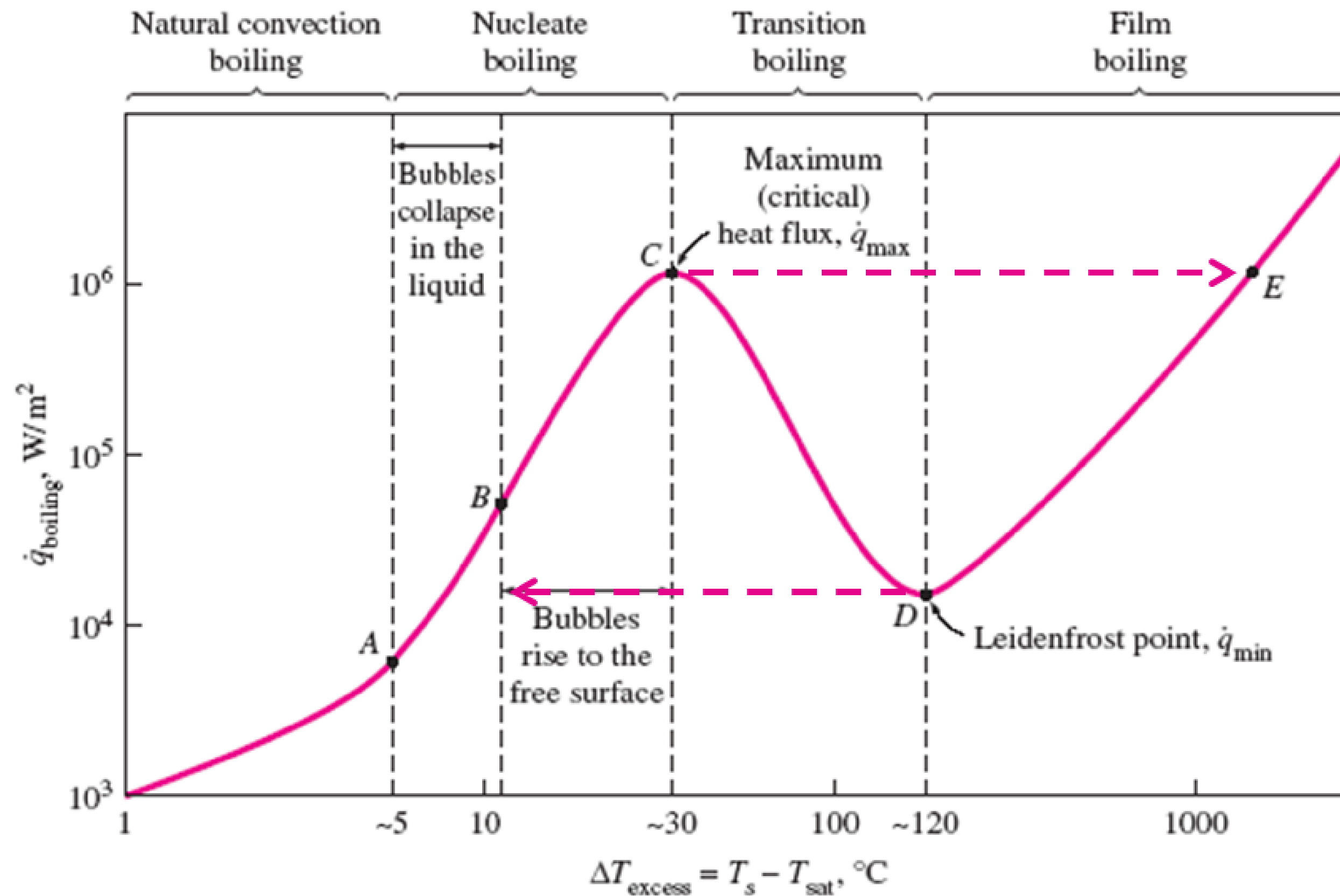
Agenda

1. Wstęp – elektrownie jądrowe, krytyczny strumień ciepła, marginesy bezpieczeństwa.
2. Hipoteza
3. Narzędzia, motywacje, oraz cele
4. Wyniki
5. Konkluzje i podsumowanie

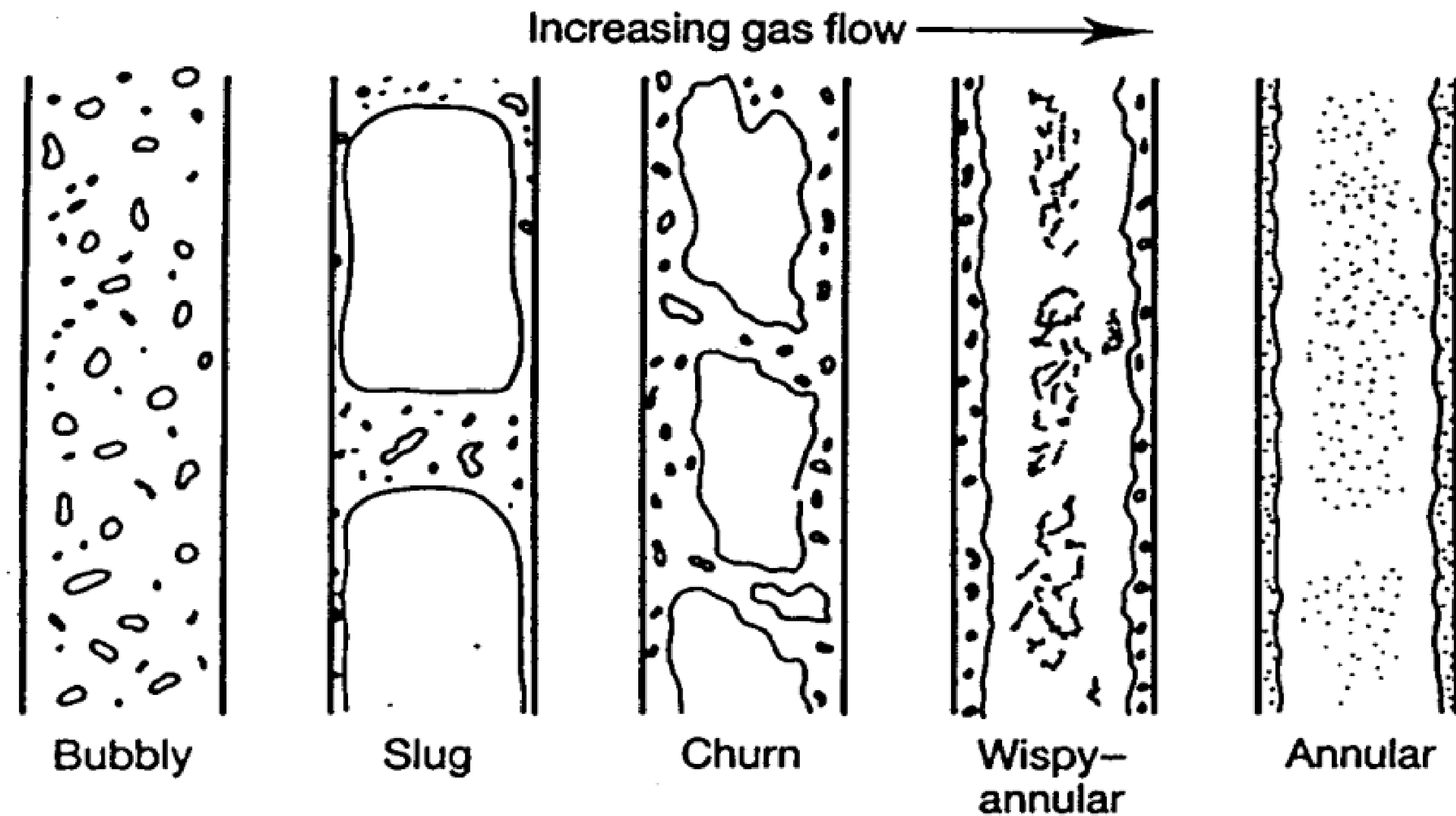




- Podgrzew oraz odparowanie wody następuję w rdzeniu reaktora
- Para wygenerowana w ten sposób przechodzi na turbinę parową.

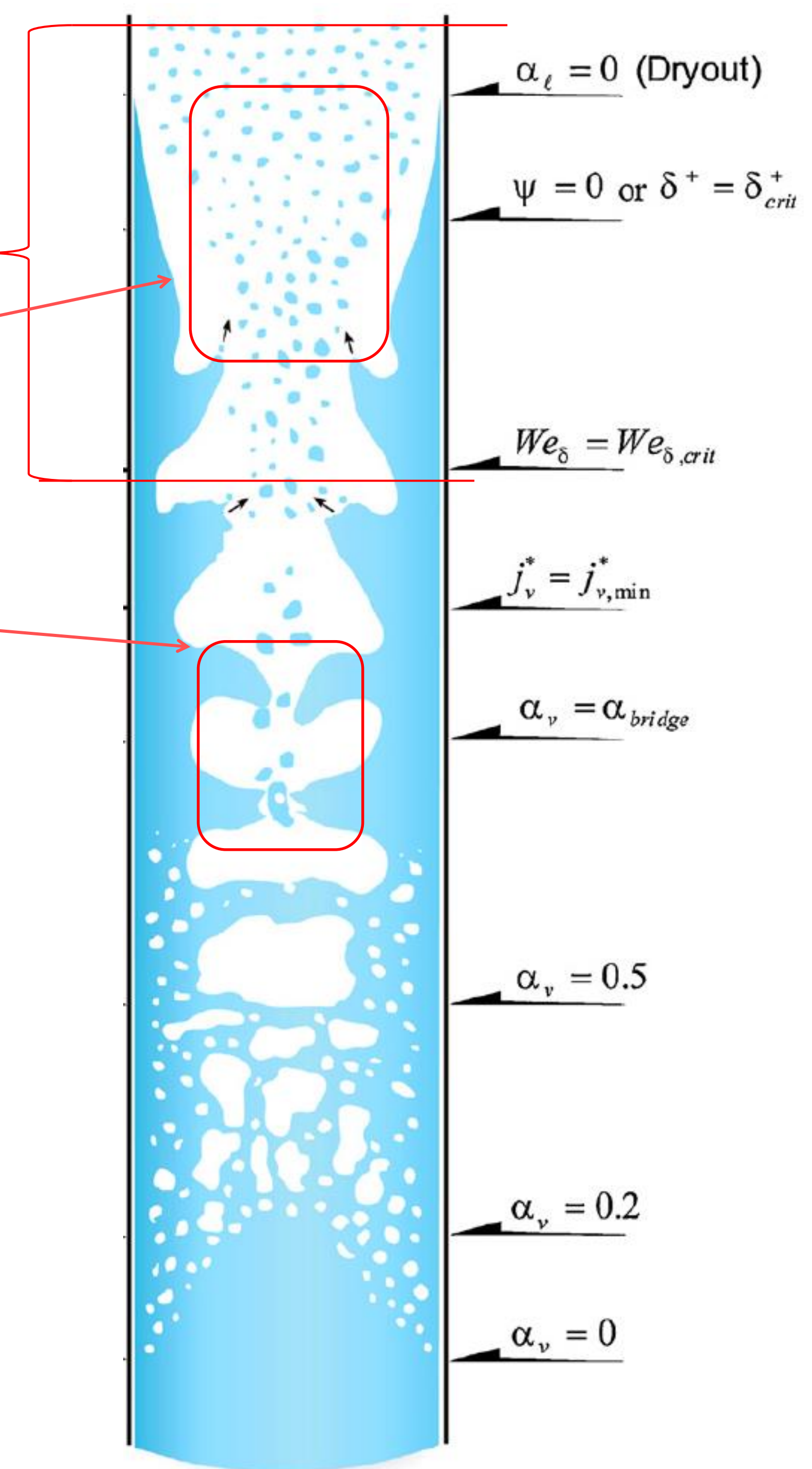


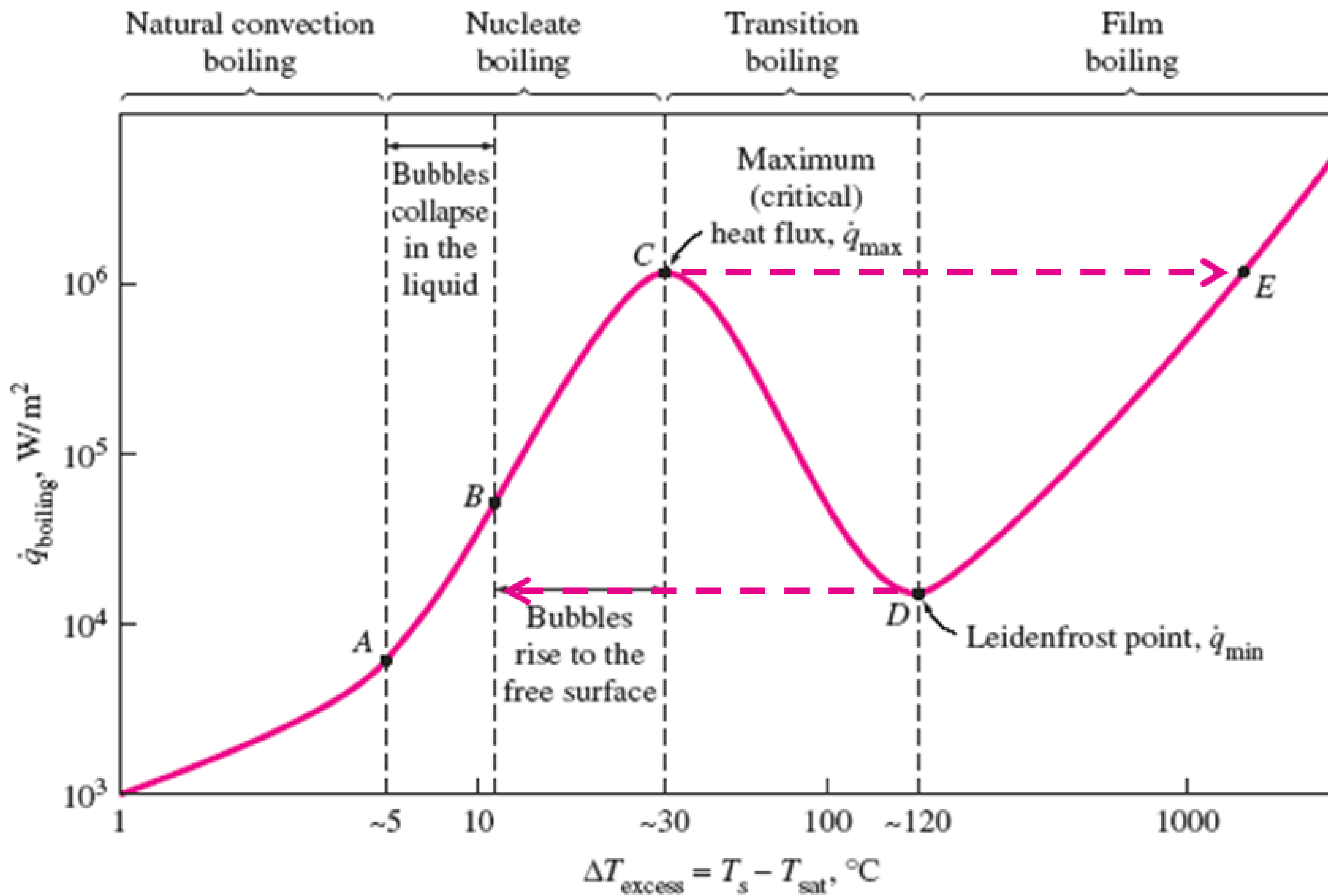
- Reaktor BWR jest systemem idącym drogą AB-CE.
- Wraz ze wzrostem strumienia ciepła, dochodzimy do punktu C.
- W tym momencie, niewielki wzrost strumienia skutkuje nagłym i bardzo dużym wzrostem temperatury pręta paliwowego.
- Jest to spowodowane wyschnięciem ciekłej warstwy przyściennej.



- Wraz z dostarczaniem ciepła, ilość pary się zwiększa
- Ze wzrostem pary, zmienia się reżim przepływu.
- Zjawisko osuszenia występuje przy przepływie pierścieniowym (annular)

- Strumień ciepła
- Zjawiska odrywania i osadzania
- Początkowe wartość frakcji oderwanej
- Długość przepływu pierścieniowego





- Poziom bezpieczeństwa zapewniany jest poprzez zachowanie odpowiednich marginesów bezpieczeństwa.
- Margines bezpieczeństwa jest na tyle duży, aby nie dopuścić do wystąpienia osuszenia.
- Wielkość tego marginesu wynika z niepełnej wiedzy na temat wystąpienia tego zjawiska

Czy i jak można ulepszyć szacunki
krytycznego strumienia ciepła?

Jak oszacować bezpieczeństwo?

9

- Modelowanie matematyczne przepływu
 - Równania bilansu masy, pędu i energii dla wszystkich faz
- Modele matematyczne rozpatrywanych zjawisk
 - Zjawiska osadzania i odrywania
 - Kryterium wystąpienia przepływu pierścieniowego
 - Początkowa wartość frakcji oderwanej
 - Kryterium wystąpienia osuszenia

- CATHARE-3
 - **C**ode for **A**nalysis of **T**hermalhydraulics during an **A**ccident of **R**eactor and safety **E**valuation
 - Ponad 30 letnie doświadczenia francuskiego dozoru jądrowego
 - Bezpieczeństwo większości elektrowni jądrowych Francji zostało zanalizowane kodami z rodziny CATHARE.
 - Zaimplementowane równania bilansu masy, pędu i energii dla 3 faz.
 - Faza ciekła
 - Faza gazowa
 - Faza oderwanych kropelek
 - Razem 9 równań

DARIA

- **D**eterministic **A**nalysis for ma**R**IA reactor
- Autorskie narzędzie obliczeniowe napisane w pythonie 3.
- Bilans masy dla 3 faz
- Bilans pędu dla 2 faz
- Bilans energii dla 1 fazy

1. Modelowanie

1. Mechanistyczne aspekty obliczeń – aby poprawnie obliczyć krytyczny strumień ciepła, musimy mieć pełną informację nt. przepływu oraz ich modeli
2. Brak jednoznacznej „zgody” jakie zjawiska powinny być modelowane
3. Zjawiska fizyczne mają wiele różnych modeli dla różnych warunków.

2. Energia Jądrowa

1. Uzyskanie poprawnych wyników, obarczonych niewielkimi niepewnościami spowoduje obniżenie marginesów bezpieczeństwa.
2. Reaktory mogą być dzięki temu efektywniejsze przy zachowaniu tego samego poziomu bezpieczeństwa.
3. Energia jądrowa może stać się tańsza.

1. Implementacja propozycji dokładniejszych modeli w kodzie systemowym CATHARE-3.
2. Ewaluacja modeli Hewitt-Govan-a oraz w/w propozycji przy pomocy kodu CATHARE-3 względem eksperymentów bez wymiany ciepła.
3. Ewaluacja w/w modeli przy pomocy kodu CATHARE-3 względem eksperymentów badających krytyczny strumień ciepła.
4. Rozwinięcie autorskiego 1-wymiarowego kodu DARIA z implementacją modelu Hewitt-Govan.
5. Przeprowadzanie analizy niepewnościowej i czułościowej modelu Hewitt-Govana przy użyciu kodu DARIA.

Eksperymenty bez wymiany

ciepła

Experiment	Length	D_h	Pressure	Mass Flux	Quality	runs
Hewitt-Pulling [60]	3.65	0.93	2.39-4.46	297	14-75	70
Keey's [61]	3.66	1.26	35-69	1350-2760	14-68	21
Singh [62]	2.54	1.252	68.94	542-949	30-81	8
Wurtz 200 [48]	9	1.0	30-90	500-3000	8-60	72
Wurtz 600 [48]	9	2.0	70	500-3000	20-70	21

Table 3.2. Summary of adiabatic experimental databases used in this study.

Eksperymenty z wymianą ciepła

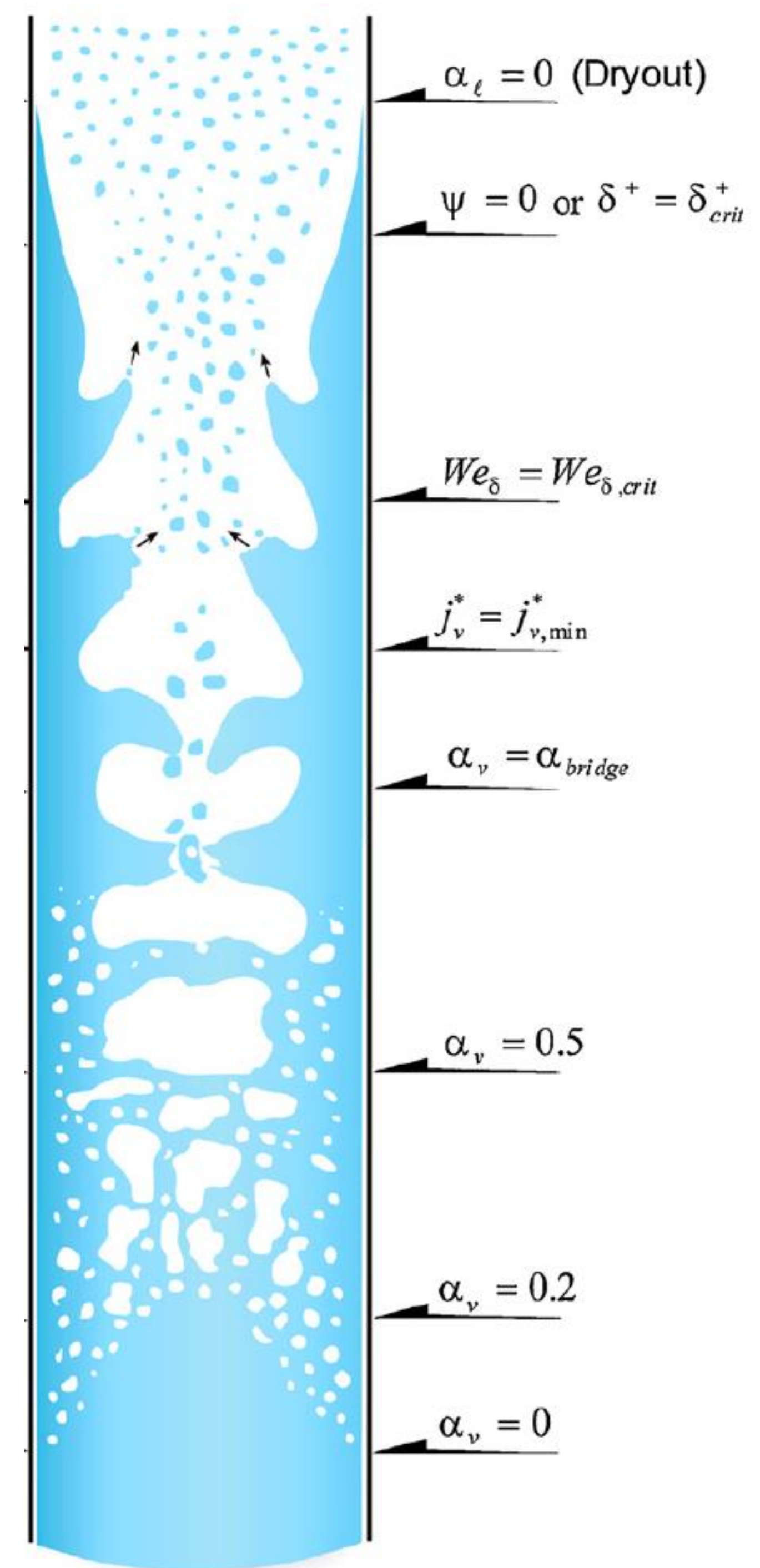
Experiment	Length	D_h [mm]	Pressure	Mass Flux	Heat Flux	z_{bo}	used runs
Wurtz 300 [48]	2-6	1.0	30-90	500-3000			78
KTH [46]	3.65	1.4	70	750-1750			21
Becker [63]	7	10 - 14.9	29-100	500-3000	0.2-1.3		ca. 180
Söderquist [64]	1-6	8	1-200	250-6000	0.15-3.9	1-6	ca. 1400

Table 3.3. Summary of diabatic experimental databases used in this study.

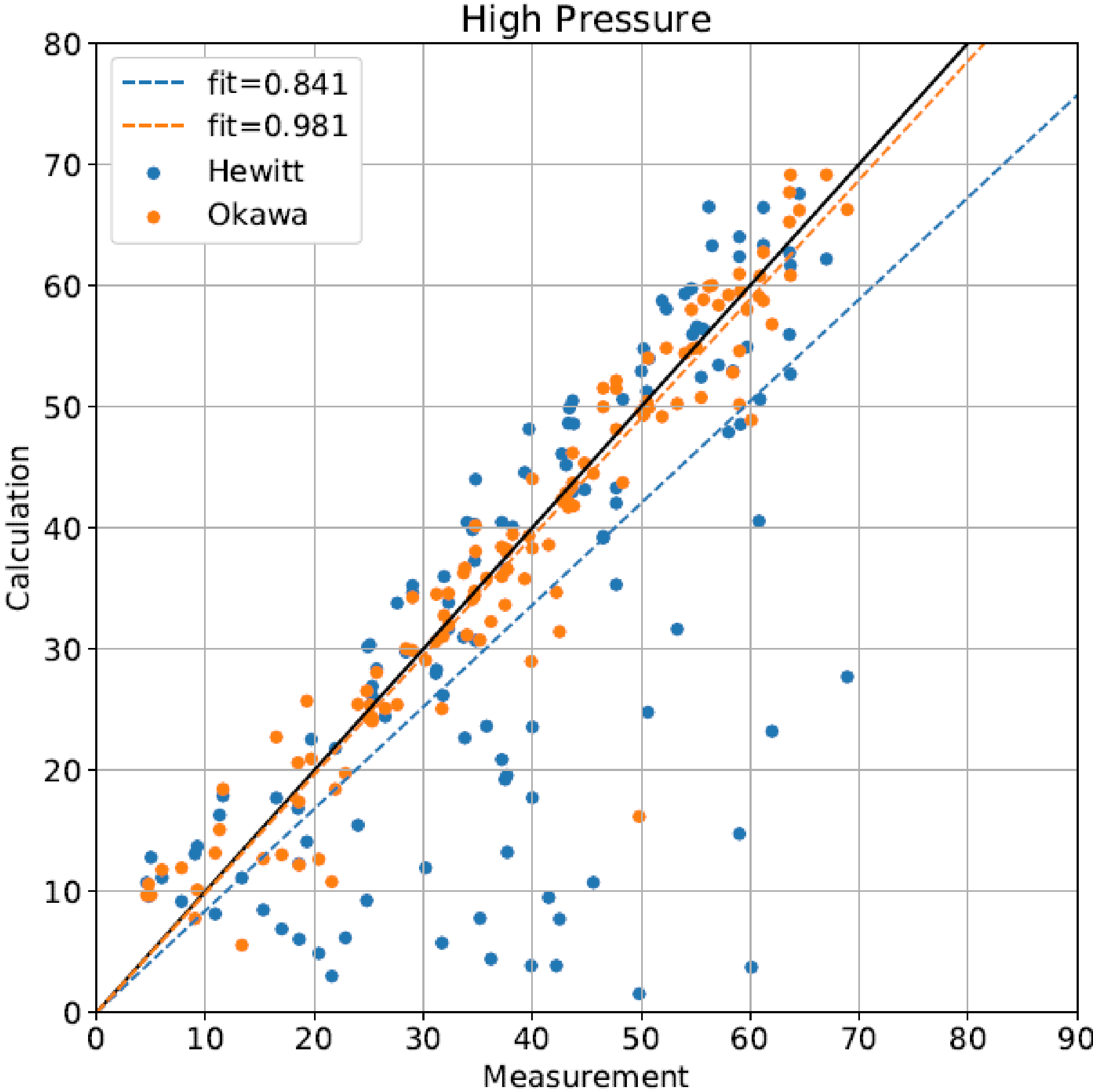
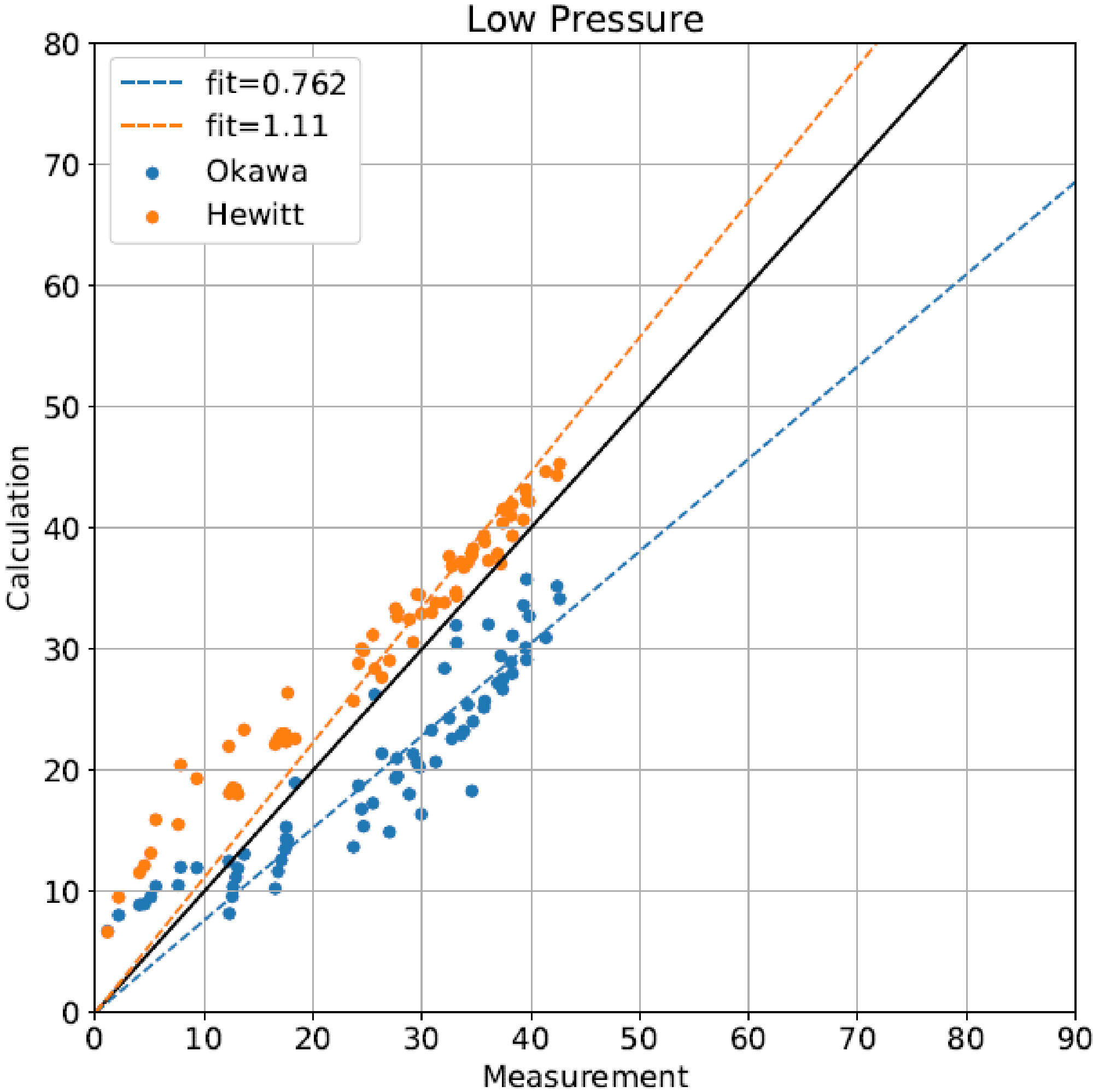
1. Implementacja propozycji lepszego modelu w kodzie systemowym CATHARE-3.
 2. Ewaluacja modeli Hewitt-Govana oraz w/w propozycji przy pomocy kodu CATHARE-3 względem eksperymentów bez wymiany ciepła.
- Po przeglądzie literatury zaproponowanym modelem jest model Okawa et al.
 - Ewaluacja odbyła się na drodze porównania wyników symulacji z pomiarami eksperymentalnymi.

Wartością mierzona jest stosunek masy kropelek wody do całkowitego przepływu wody – tzw. MEMT.

Porównywane więc będą wartości MEMT zmierzone w eksperymencie z wartościami MEMT uzyskanymi w symulacji.



Wyniki – część 1.



			Fitting coefficient	
Experiment	P	Mass Flux	Hewitt	Okawa
Hewitt-Pulling	2.39-4.46	297	1.11	0.762
Keays	34.47-68.94	1350-2760	0.929	0.993
Singh	68.94	542-949	0.698	0.933
Wurtz-200	30	1000	1.03	0.958
		2000	1.11	0.988
	50	500	0.581	0.842
		1000	0.549	0.787
		2000	0.927	0.985
	70	500	0.321	0.678
		750	0.493	1.06
		1000	0.609	1.01
		2000	0.829	0.985
		3000	0.879	1.02
	90	500	0.95	1.37
		1000	0.443	0.93
		2000	0.702	0.948
Wurtz-600	70	500	0.345	0.893
		750	0.672	1.06
		1000	0.842	1.05
		2000	1.01	1.04

Table 7.1. Summary of all adiabatic calculations performed in *CATHARE-3*.

- Porównanie statystyczne.
- Wartość 1 oznacza ideał.
- Poza warunkami niskiego ciśnienia, model Okawa et al. lepiej przewiduje kluczowy parametr.

$$IEF = 0.3 \quad \text{for} \quad G < 500$$

$$IEF = \frac{0.127 \cdot G - 60.386}{G \cdot x_{tr}} \quad \text{for} \quad 500 < G < 1800$$

$$IEF = 0.75 \quad \text{for} \quad 1800 < G$$

Dla części eksperymentów z wymianą ciepła, zaproponowano dodanie modelu początkowej frakcji oderwanej (IEF)

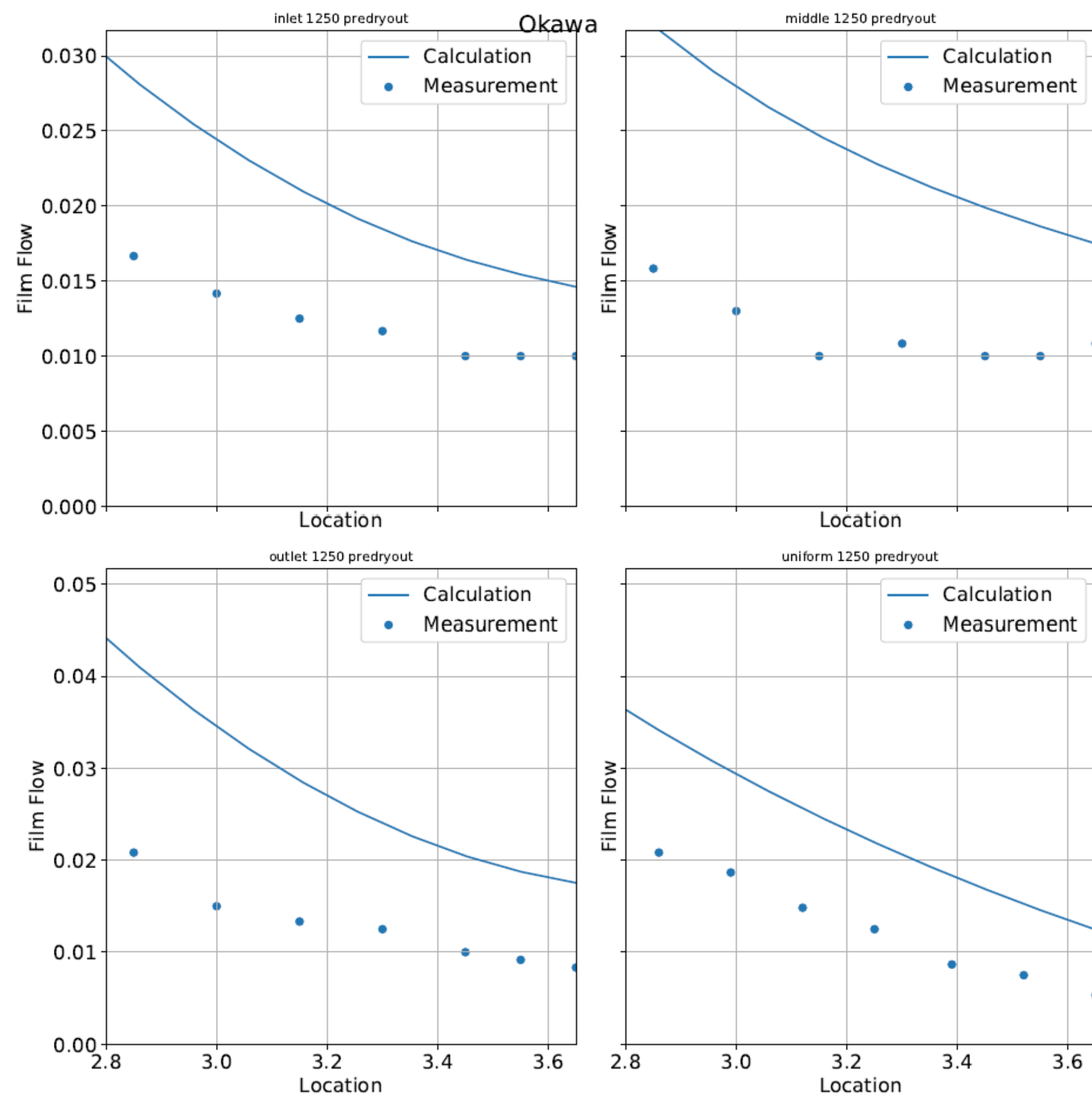


Figure 7.22. Okawa model with IEF equal 0 implemented into CATHARE-3 system code.

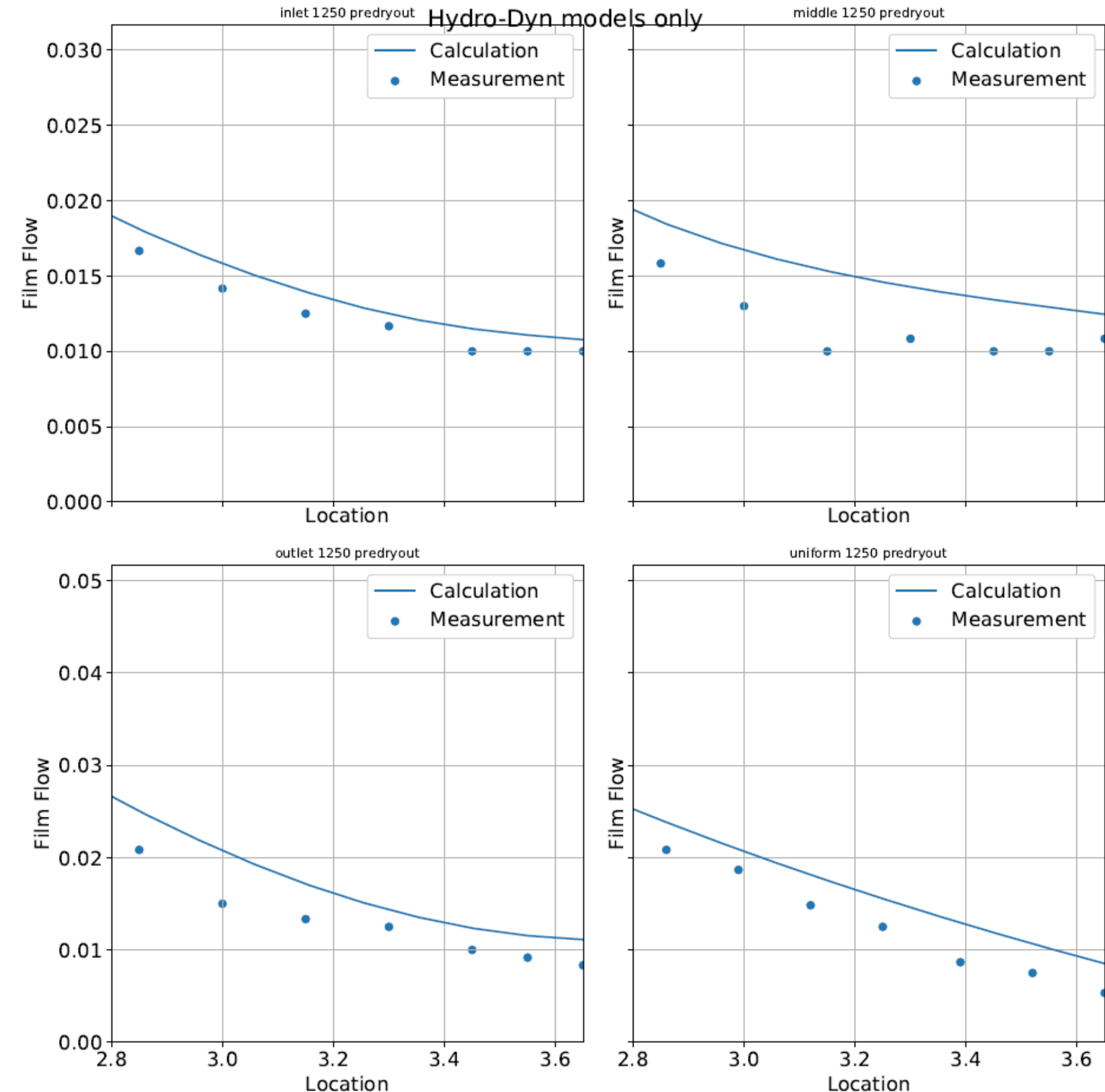


Figure 7.24. Okawa model with IEF correlation implemented into CATHARE-3 system code.

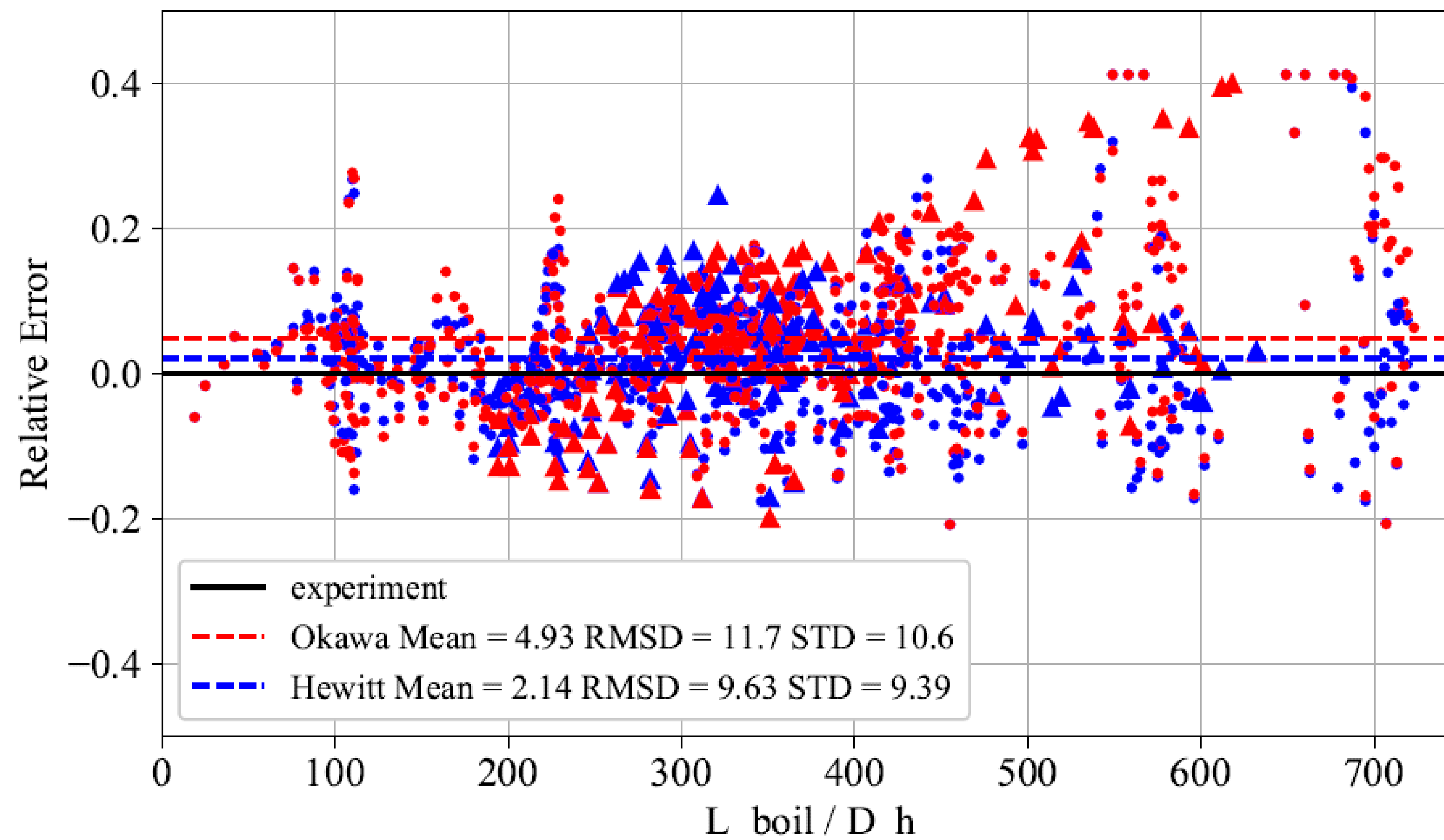
3. Ewaluacja w/w modeli przy pomocy kodu CATHARE-3 względem eksperymentów badających krytyczny strumień ciepła.

- Porównanie wyników z innymi kodami
- Porównanie wyników obliczeń z bazą eksperymentów
- Analiza wpływu IEF na wyniki

	MEFISTO-T	GRAMP	SCADOP	CATHARE-3
Mean error	-1.86%	-2.94%	-3.06%	-1%
RMS error	6.15%	6.41%	5.89%	5.7%
σ	3.95%	3.61%	3.73%	5.3%

Table 8.1. Summary of errors of databases of BARC and Harwell for MEFISTO-T, GRAMP and SCADOP codes as well as Becker and Söderquist experimental results for CATHARE-3 for equivalent range of conditions.

Porównanie wyników CATHARE-3 z innymi kodami (MEFISTO, GRAMP, SCADOP).



- Oba modele dają relatywnie podobne wyniki.
- Diabeł tkwi w szczegółach

Figure 8.3. Relative error distribution for all considered experimental cases. Solid circles indicate calculation data from Söderquist et al. [64] experiment, whereas solid triangles — from Becker et al. [63].

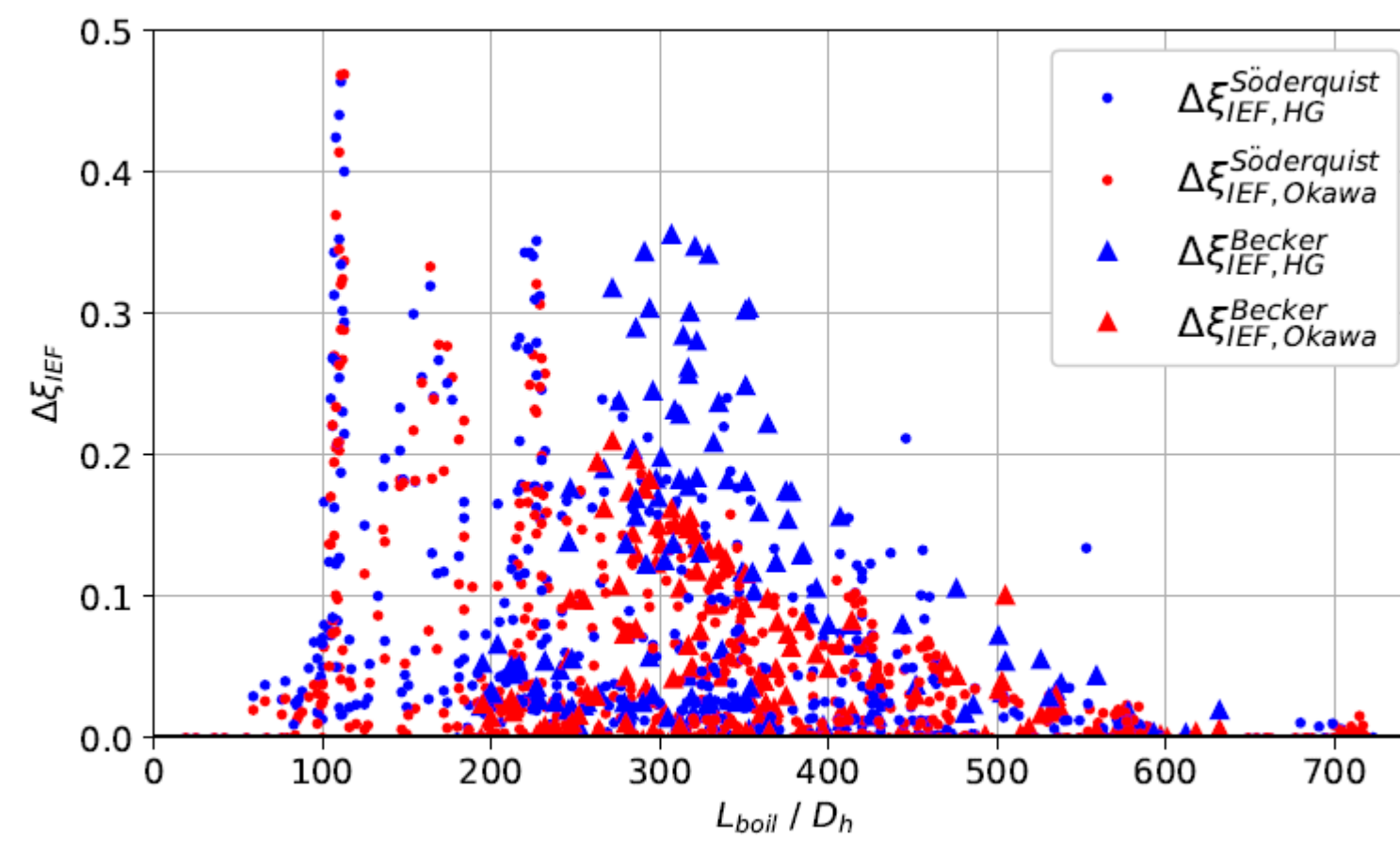


Figure 8.7. Influence of initial entrained fraction plotted against L_b/D_h

1. Błąd obliczeń może zostać poprawiony dodając IEF
 2. Błąd obliczeń jest zawsze większy niż 5% niezależnie od wartości IEF
 3. Błąd obliczeń się zwiększa po dodaniu IEF
 4. Dodanie IEF nie zmienia wyniku
- Są obszary w których oba modele nie dają poprawnych wyników a uwzględnienie dodatkowych zjawisk nie skutkuje ich polepszeniem
 - Potrzebne inne modele

Dla obszarów gdzie
wyniki można poprawić
zaproponowano model
IEF

$$IEF = A \cdot (J_{l,tr}^*)^B + C \cdot (J_{g,tr}^* - J_{g,0})^D$$

Models	Parameters				
	A	B	C	D	$J_{g,0}$
Hewitt	-4.946	-1.8926	1.0222	-0.2982	1.346
Okawa	-7.5	-2.185	1.1368	-0.3	1.4

Table 8.7. Coefficients for IEF correlation

Wyniki – część 2.

28

W przedziałach w których IEF odgrywa istotną rolę zaobserwowaną znaczącą poprawę wyników w przypadku obu modeli.

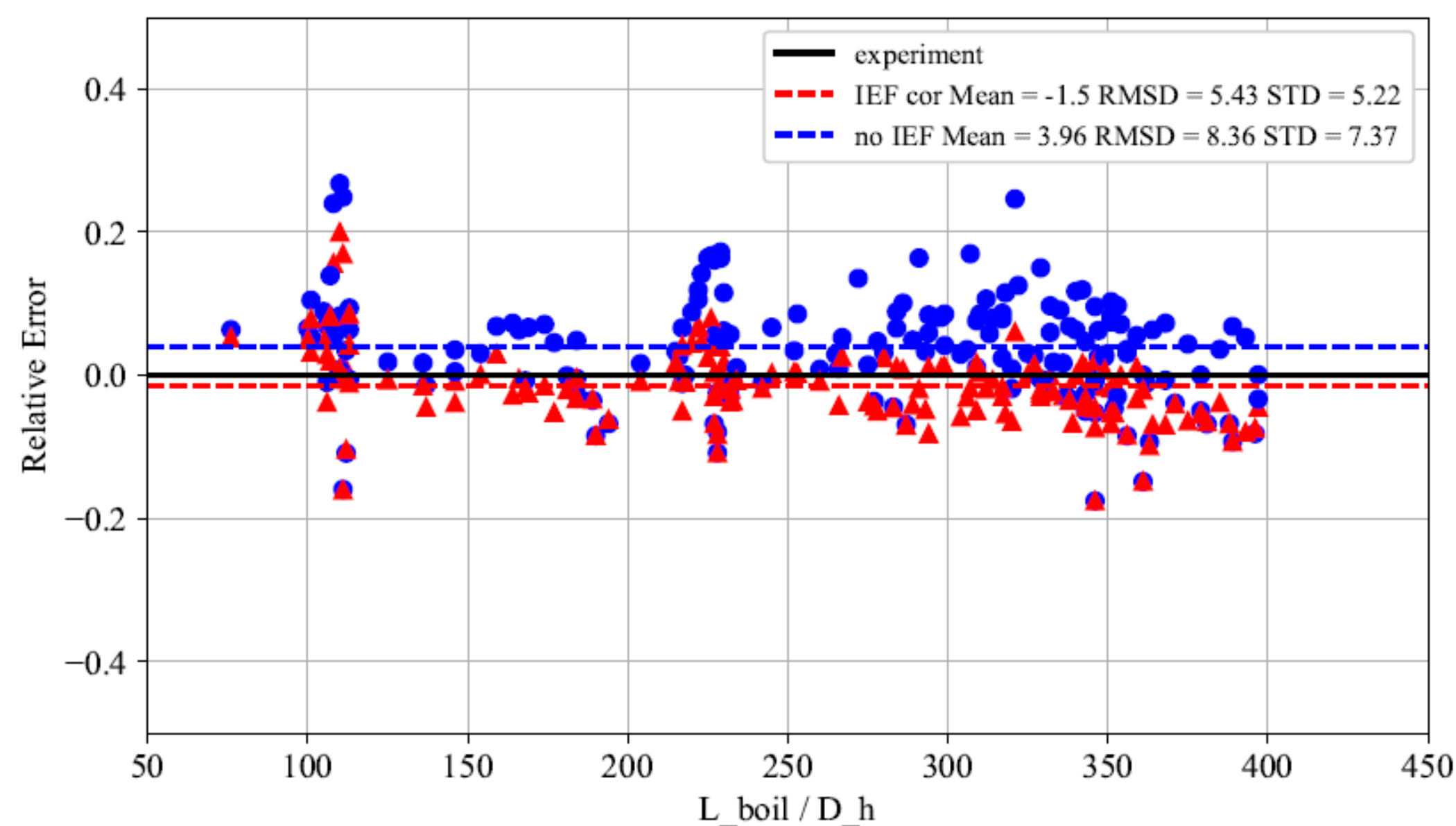


Figure 8.11. Comparison of calculation results between IEF = 0 (blue circles) and with IEF correlation (red triangles) at pressures ranging from 3 to 5 MPa for Hewitt-Govan model.

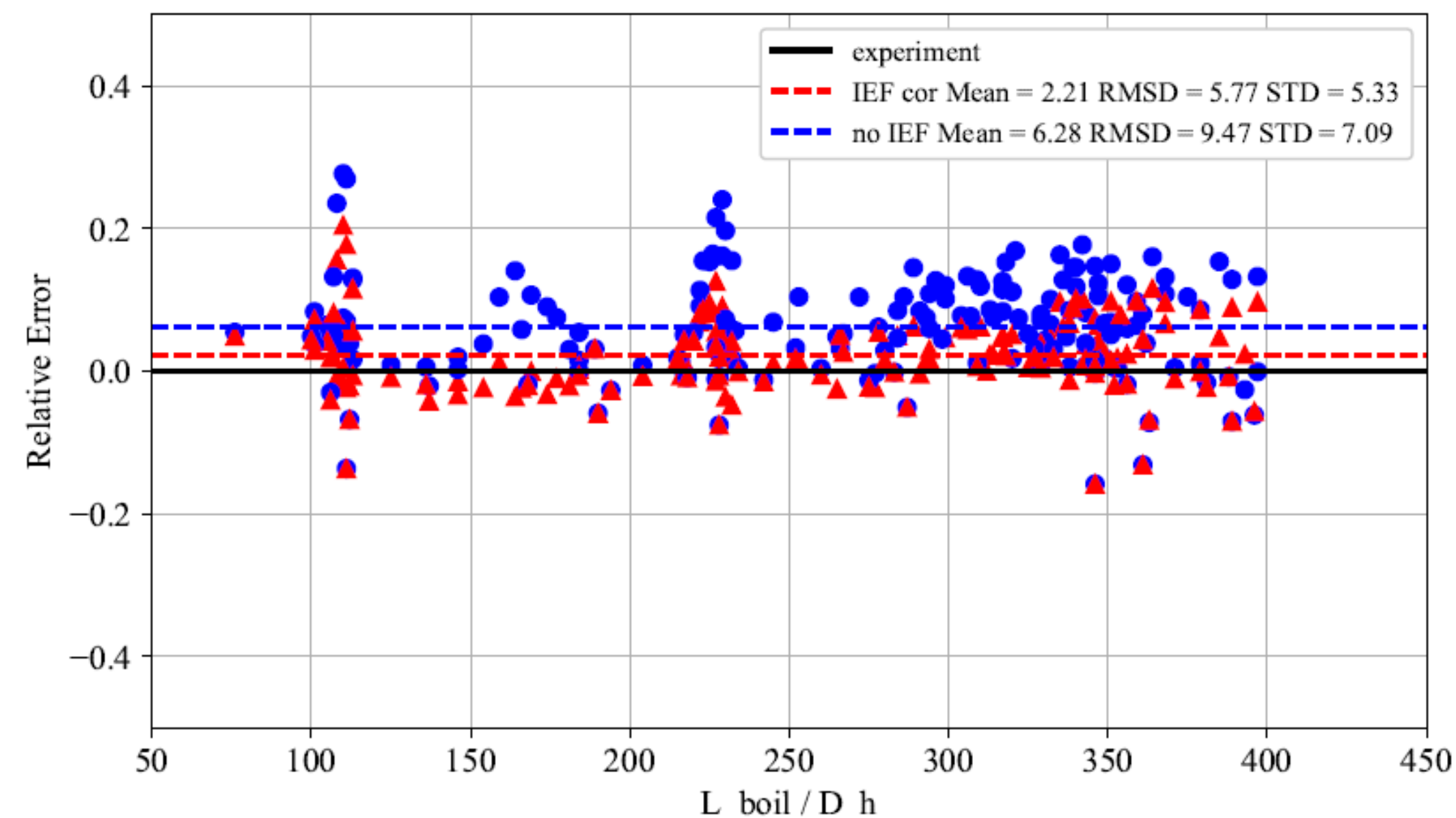


Figure 8.12. Comparison of calculation results between IEF = 0 (blue circles) and with IEF correlation (red triangles) at pressures ranging from 3 to 5 MPa for Okawa et al. model.

4. Rozwinięcie autorskiego 1-wymiarowego kodu DARIA z implementacją modelu Hewitt-Govan.

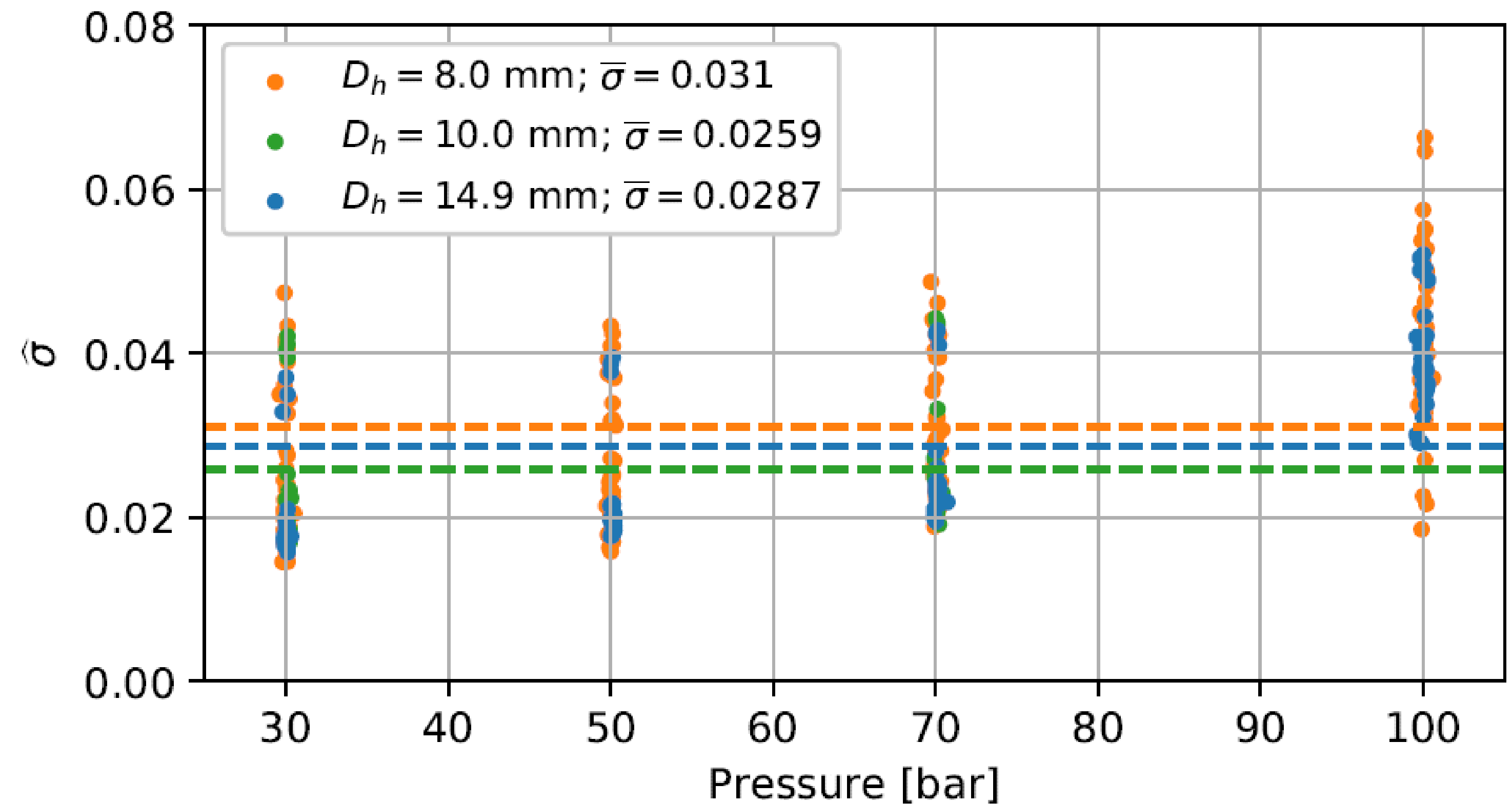
5. Przeprowadzanie analizy niepewnościowej i czułościowej modelu Hewitt-Govana przy użyciu kodu DARIA.

- Stworzenie grupy parametrów wejściowych dla zasymulowania niepewności następujących parametrów:
 - Ciśnienie,
 - Strumień masowy,
 - Przechłodzenie wody,
- W zakresie 5% bazowej wartości parametru.
- Wykonano ok. 24 000 obliczeń dla jednego przypadku eksperymentalnego
- W sumie wykonano ok. 8 milionów obliczeń.

Wyniki – część 3.

30

- Niepewności obliczeń
- Zaobserwowano, że następuje wzrost niepewności obliczeń dla ciśnienia 100 barów.
- Dla niższych ciśnień niepewności te nie przekraczają bazowych 5%



Niepewności dla ciśnienia 100 bar

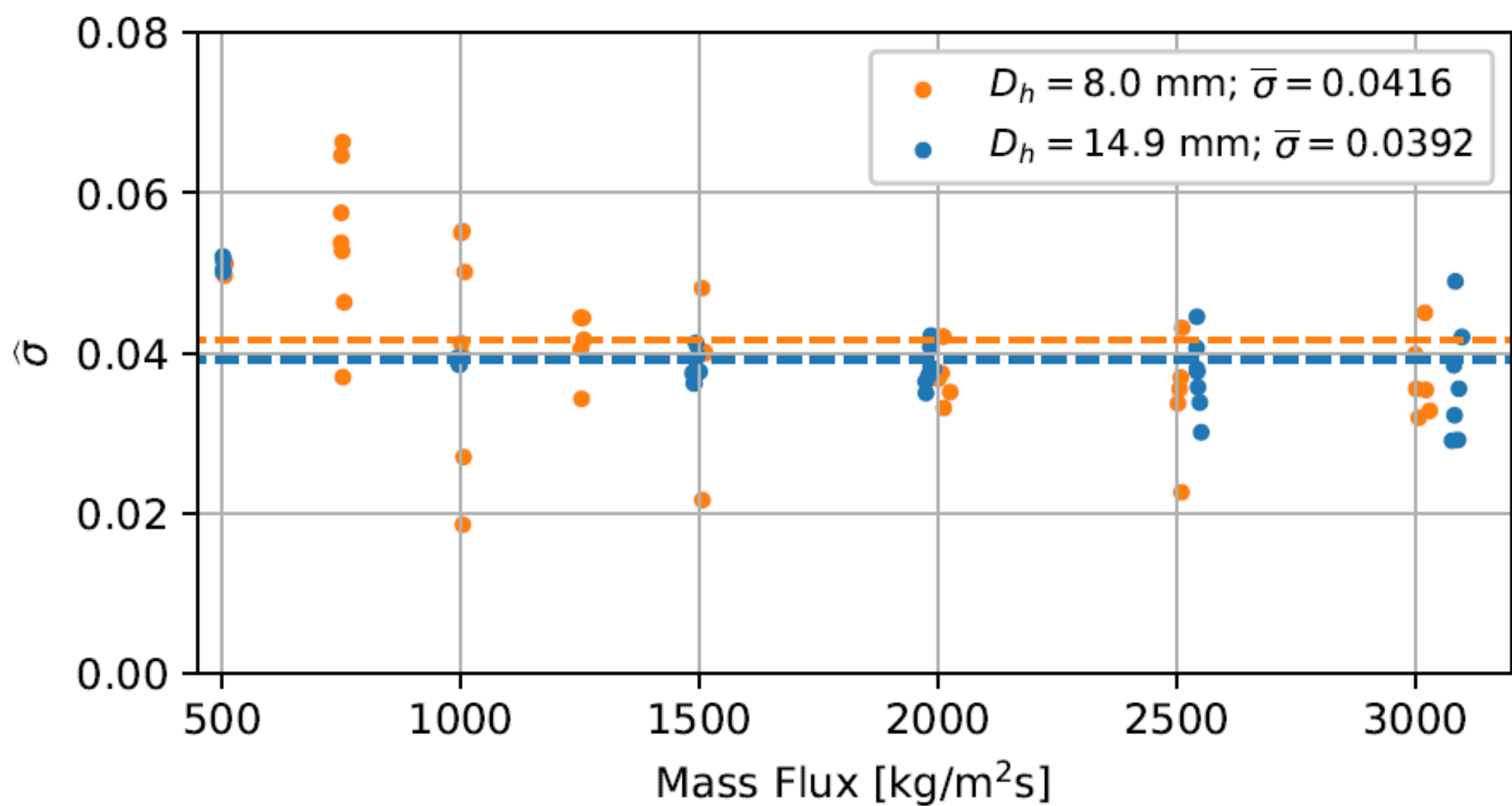


Figure 9.2. Normalised standard deviation (Eq. 9.4) of all calculation results at pressure equal 100 bar plotted with respect to mass flux for three considered hydraulic diameters.

Niepewności dla ciśnień poniżej 100 bar

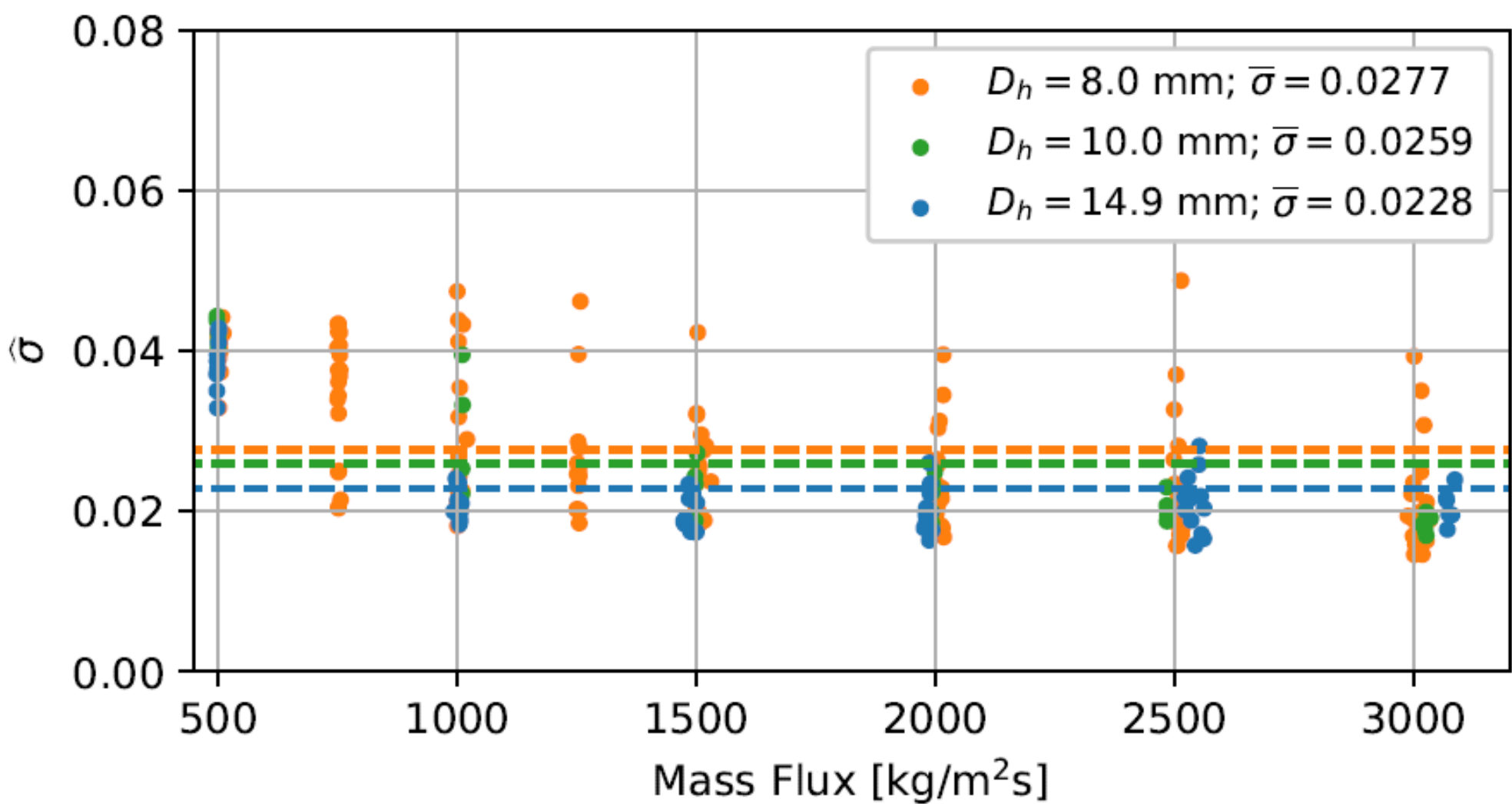


Figure 9.3. Normalised standard deviation (Eq. 9.4) of all calculation results at pressure ranging from 30 to 70 bar plotted with respect to mass flux for three considered hydraulic diameters.

Największym źródłem niepewności,
jest niepewność strumienia

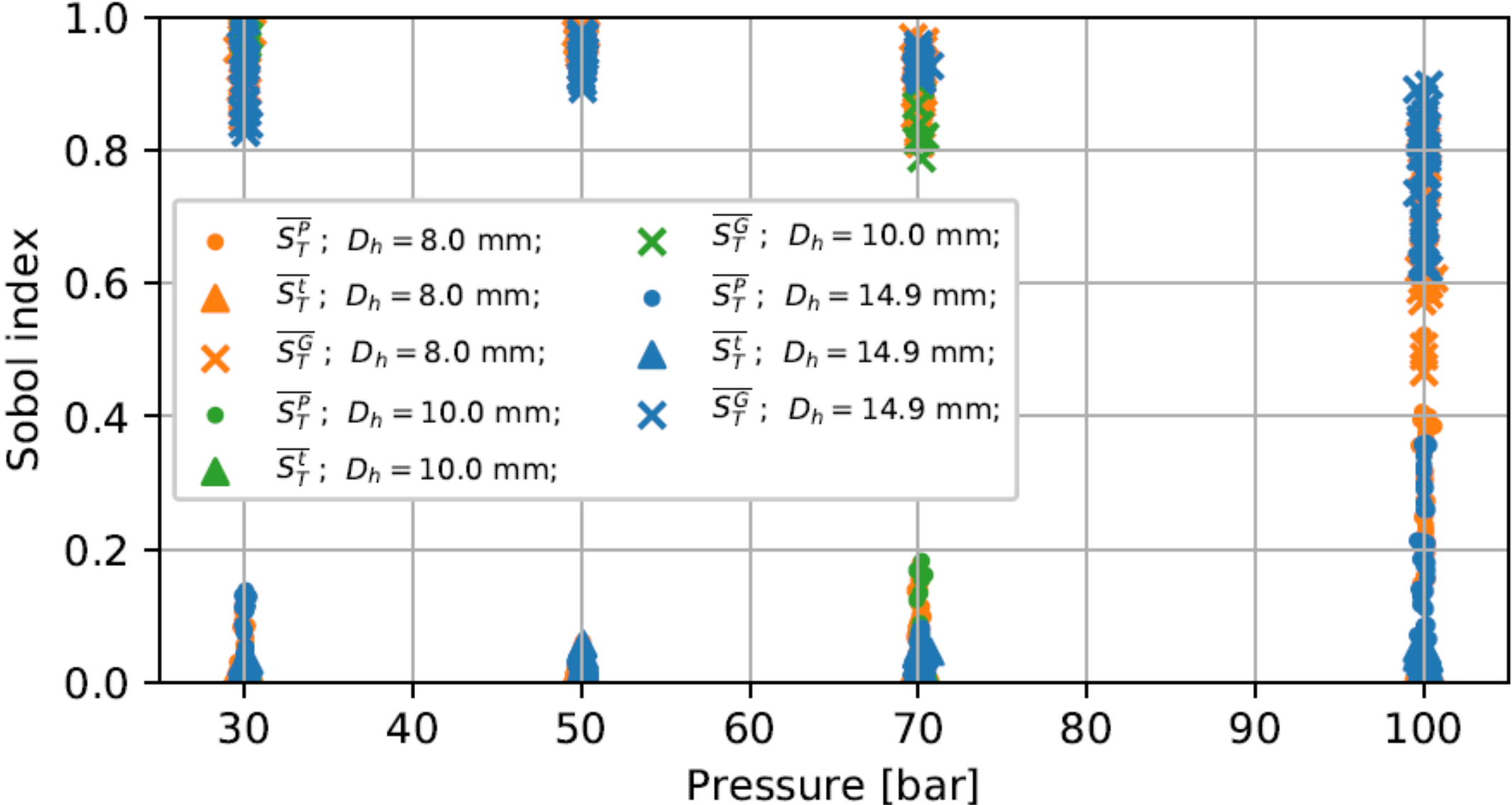


Figure 9.4. Sobol total order index (Eq. 5.13) from GSA of all experimental results plotted with respect to pressure for three considered hydraulic diameters.

Dla ciśnienia 100 barów, swój udział w
niepewności wyniku zaczyna mieć także

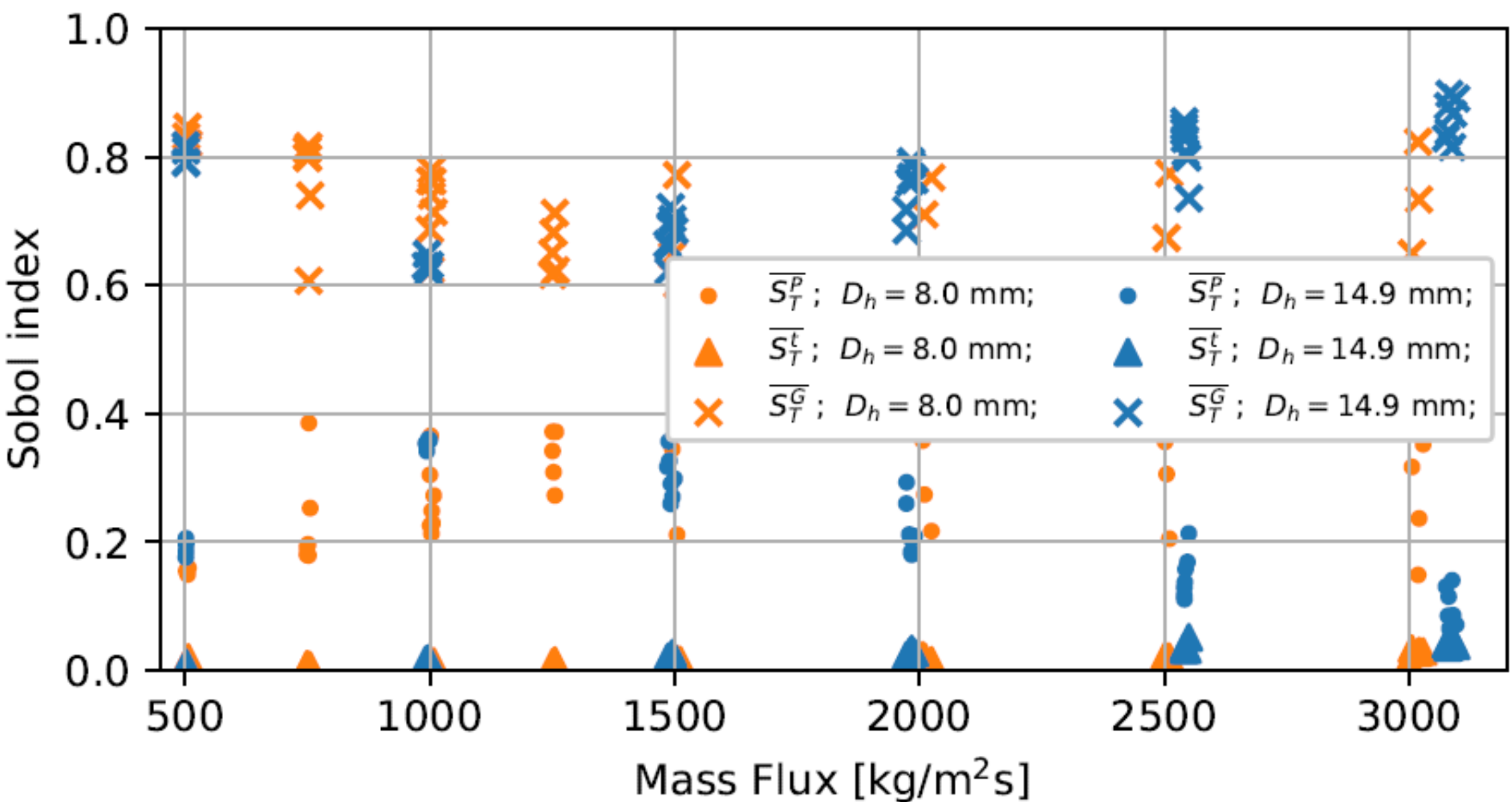


Figure 9.5. Sobol total order index (Eq. 5.13) from GSA of all experimental results at pressure 100 bar plotted with respect to mass flux for three considered hydraulic diameters.

Wyniki – część 3.

33

- Wprowadzenie IEF o wartości 0.7 powoduje obniżenie niektórych niepewności, nawet o 50-60%
 - Np. z 5% na 2%

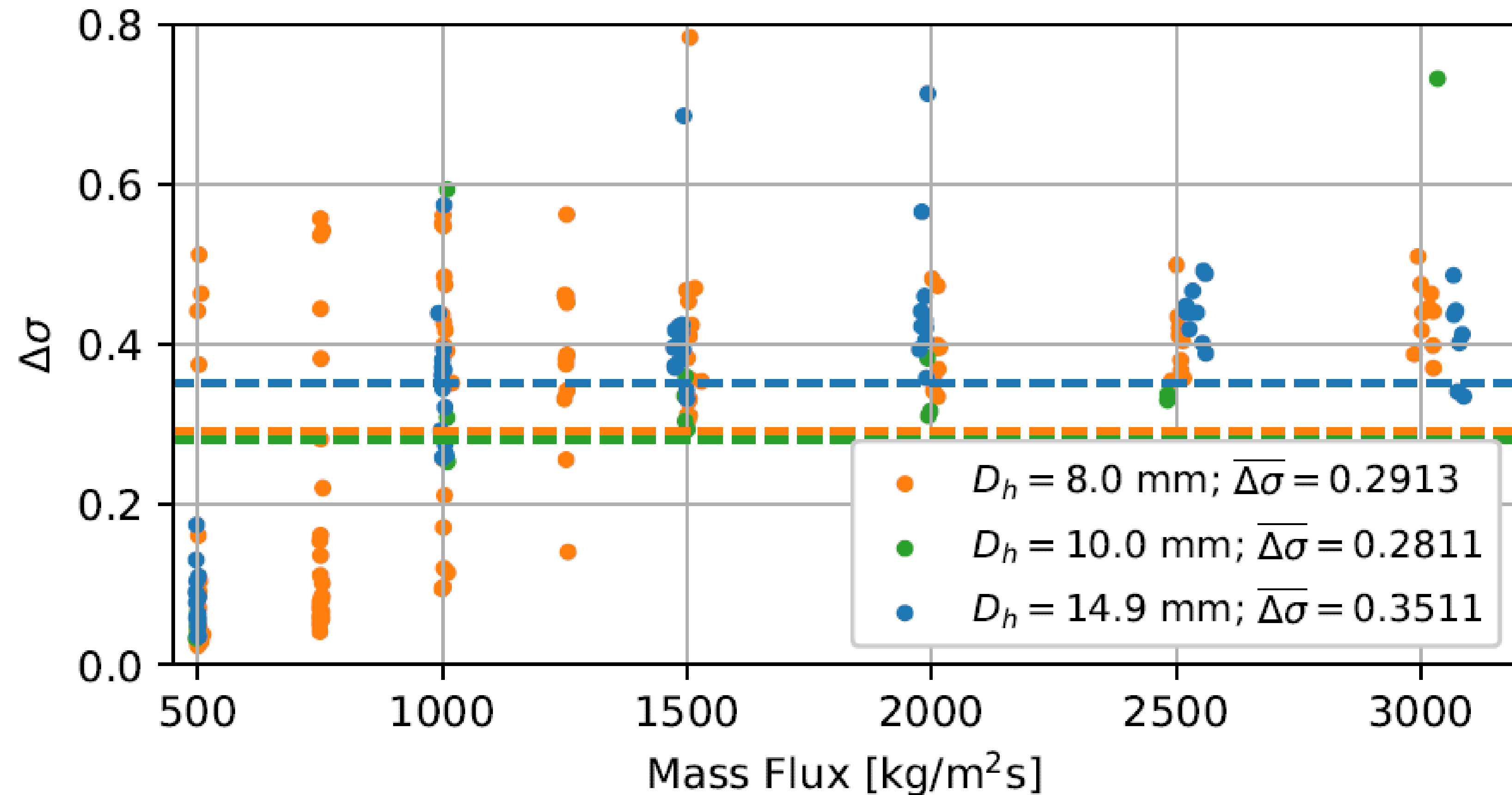


Figure 9.6. IEF Uncertainty reduction (Eq. 9.7) with respect to mass flux.

1. Zaimplementowano model Okawa et al. do kodu CATHARE-3 – jako alternatywę dla modelu Hewitt-Govan.
2. Ewaluacja obu modeli na bazie eksperymentów adiabatycznych pokazała, że dzięki modelowi Okawa można uzyskać dokładniejsze wyniki. Kolejnym usprawnieniem była implementacja modelu na początkową frakcję oderwaną.
3. Ewaluacja obu modeli na bazie eksperymentów z krytycznym strumieniem ciepła pokazała, że dodając IEF można poprawić wyniki tylko w konkretnym ograniczonym zakresie warunków przepływu. Zaproponowano model IEF który poprawia wyniki tam gdzie było to możliwe.
4. Zaimplementowano model Hewitt-Govan do autorskiego narzędzia obliczeniowego DARIA
5. Przeprowadzono analizę niepewności i wrażliwości modelu Hewitt-Govan przy użyciu kodu DARIA

Przedstawiając wyniki ze zrealizowanych kroków, można
uznać, że teza:

*„Czy i jak można ulepszyć szacunki
krytycznego strumienia ciepła?”*,

została udowodniona.

**Politechnika
Warszawska**

Dziękuję za uwagę.

Michał Spirzewski

