

Oszacowanie możliwości przewidywania “dryout’u” w CATHARE- 3

Analiza modeli zjawisk odrywania i osadzania kropelek wody w kodzie CATHARE-3 wraz z zaproponowanymi zmianami.

Michał Spirzewski, NCBJ

Zarys prezentacji

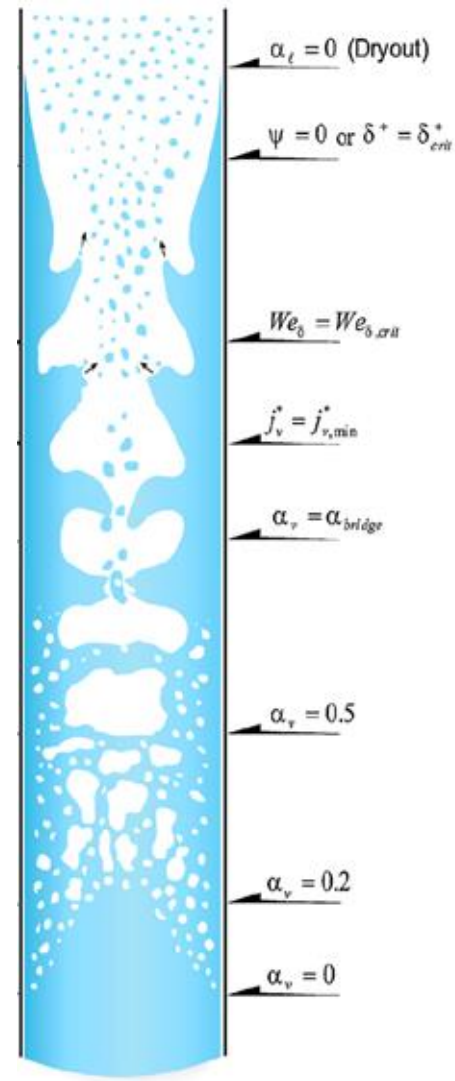
1. Motywacja pracy.
2. Analizowane zjawiska.
3. Obecny stan modeli CATHARE-3.
4. Zaproponowane zmiany i wstępne wyniki
5. Re-ewaluacja modeli
6. Ostateczny zestaw korelacji wraz z wynikami
7. Podsumowanie i konkluzje

Motywacja

- Zakończenie prac projektu NURESAFE
- Realizowanie prac tematycznie związanych z doktoratem
- Szansa na zacieśnienie współpracy z CEA
 - Wspólne projekty
 - Wymiana naukowa

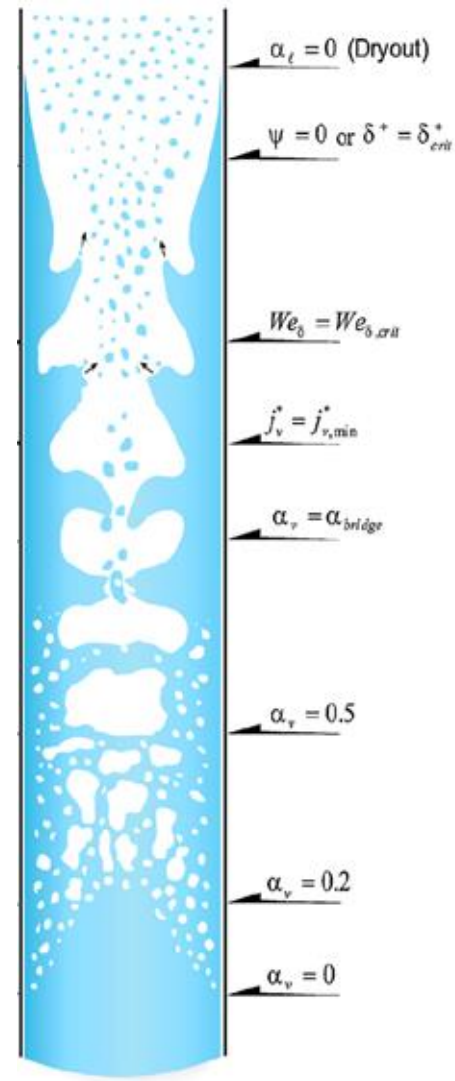
Przepływ pierścieniowy w Reaktorach Wrzących

- Wysoki udział objętościowy pary
- Brak „mostów wodnych”
- 3 „pola przepływu”
 - Ciągłe gazowe (ang. Continuous vapour)
 - Ciągłe ciekłe (ang. Continuous liquid)
 - Rozproszone ciekłe (ang. Dispersed liquid)
- Wymiana masy i pędu między ciekłymi polami przepływu
 - Odrywanie (z „filmu” do „kropel”)
 - Osadzanie (z „kropel” do „filmu”)



Co wpływa na (przewidywanie) CHF / Dryout

- Strumień ciepła
- Długość przepływu pierścieniowego
- Warunki początkowe przepływu pierścieniowego
- Strumień wymiany masy
zjawisk odrywania i osadzania
- Kryterium dla dryout'u



Stan obecny CATHARE-3

- Kryterium przepływu pierścieniowego – Kutateladze

$$Ku_v = \alpha_v V_v \left(\frac{\rho_v^2}{g \sigma (\rho_{ld} - \rho_g)} \right)^{0.25}$$

Ran = 0 when $Ku_v < 3.1$

Ran = 1 when $Ku_v < 3.3$

- **Initial Entrainment Fraction (warunek początkowy)**
 - No model – IEF = 0.0

Stan obecny CATHARE-3

- Modele odrywania

- Spowodowane tarciem międzyfazowym (Hewitt-Govan)

$$E_{HG} = G_v \cdot 5.75 \cdot 10^{-5} \left[(G_{lf} - G_{lfc})^2 \frac{D_h \rho_l}{\sigma \rho_g^2} \right]^{0.316} \left[\frac{kg}{m^2 s} \right]$$

- Spowodowane wrzeniem (Ueda)

Modele osadzania

$$m_{EB} = C \cdot \left(\frac{q''}{h_{fg}} \right)^{2.5} \left(\frac{y_{im}}{\sigma \rho_g} \right)^{0.75}$$

- Modele osadzania

- **Turbulencja w gazowym rdzeniu** (Hewitt-Govan)

$$D_{HG} = C \cdot 0.083 \cdot \max \left(0.3, \frac{C}{\rho_v} \right)^{-0.65} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_v D_h}}$$

- **Hamowanie depozycji** (Hoyer)

$$k_q = \frac{\Gamma_{lcv}}{0.065 \rho_l} \frac{D_h}{4 \sqrt{\alpha_{ld} + \alpha_g}} \cdot C$$

Proponowane zmiany

- Odrywanie – Okawa

$$E_{Okawa} = k_e \rho_l \frac{f_i \rho_v J_v^2 \delta}{\sigma} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.111}$$

współczynniki tarcia – Wallis

$$f_i = 0.005 \left(1 + 300 \frac{\delta}{D_h} \right) \quad f_w = \max \left(\frac{16}{Re_f}, 0.005 \right)$$

$$\delta = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{f_w \rho_l}{f_i \rho_v} \frac{J_f}{J_g}} \cdot D_h$$

- Osadzanie – Okawa

$$D_{Okawa} = C \cdot 0.0632 \left(\frac{C}{\rho_v} \right)^{-0.5} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_v D_h} \right)^{0.5}$$

Proponowane zmiany

- Kryterium przepływu pierścieniowego - Wallis

$$J_g^* = 0.4 + 0.6 \cdot J_l^* \qquad J_k^* = J_k \sqrt{\frac{\rho_k}{gD_h(\rho_l - \rho_g)}}$$

- IEF – założenie o wartości odpowiadającej równowadze między osadzaniem i odrywaniem – Okawa.

$$\frac{E_t}{1 - E_t} = \frac{1}{4} \cdot \frac{k_e \sqrt{f_i f_w} \sqrt{\rho_g \rho_l} J_{vap}^2 D_h}{k_d \sigma} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^n$$

Ograniczenia modelu

- Z powodu specyficznego rozwiązania problemu uwikłania wsp. tarcia była potrzeba wprowadzenia ograniczenia dla modelu odrywania.
- Gdy stosunek prędkości cieczy do prędkości gazu jest mniejszy niż 0.00114242 zakłada się, że zjawisko odrywania kropelek nie zachodzi.
- W wielu przypadkach powodowało to problemy ze zbieżnością obliczeń.

$$f_i = 0.005 + \frac{1.5}{4} \sqrt{\frac{f_w \rho_l J_f}{f_i \rho_g J_g}} \quad f_i - 0.005 = \frac{Z}{\sqrt{f_i}}$$

$$f_i^3 - 0.01 \cdot f_i^2 + 0.005^2 \cdot f_i - Z^2 = 0$$

$$\Delta = -4c^3a + c^2b^2 + 18abcd - 27d^2a^2 - 4db^3$$

$$C = \left(\frac{9cba - 27da^2 - 2b^3 + 3a\sqrt{-3\Delta}}{2a^3} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_i = \frac{1}{3} \cdot C - \frac{3ca - b^2}{3a^2 \cdot C} - \frac{b}{3a}$$

$$\frac{J_l}{J_g} = 0.00114242$$

Baza eksperymentalna

Experiment	Length [m]	D_h [cm]	Pressure [bar]	Mass flux $\left[\frac{kg}{m^2s}\right]$	quality [%]	heat flux $\left[\frac{W}{cm^2}\right]$	Runs
------------	------------	------------	----------------	---	-------------	--	------

Adiabatic tests

Hewitt-Pulling	3.65	0.93	2.39 ÷ 4.46	297	14 ÷ 75	—	70
Keays	3.66	1.26	34.47 ÷ 68.94	1350 ÷ 2760	14 ÷ 68	—	21
Singh	2.54	1.252	68.94	542 ÷ 949	30 ÷ 81	—	8
Wurtz 200	9	1.0	30 ÷ 90	500 ÷ 3000	8 ÷ 60	—	72
Wurtz 600	9	2.0	70	500 ÷ 2000	20 ÷ 70	—	21
Total	2.54 ÷ 9	0.93 ÷ 2.0	2.39 ÷ 90	297 ÷ 3000	8 ÷ 81	—	192

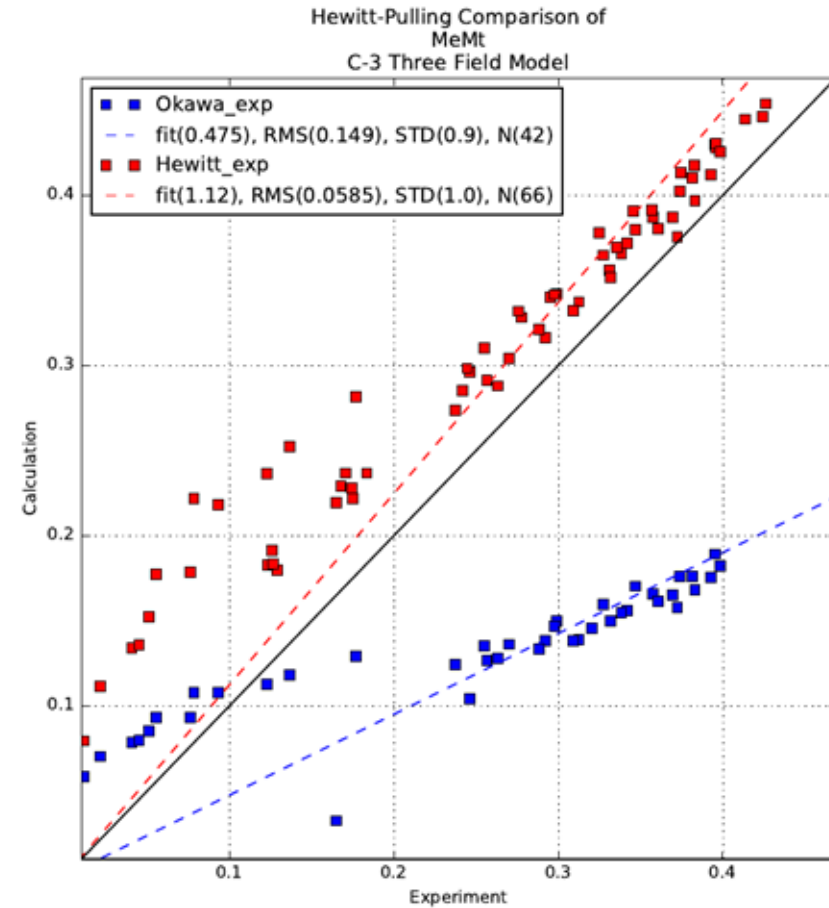
Diabatic tests

Wurtz 300	4.02	1.0	70	500 ÷ 3000	16 ÷ 80	50 ÷ 150	21
Wurtz 300(ext)	2 ÷ 6(0.1 ÷ 2)	1.0	30 ÷ 90	500 ÷ 3000	16 ÷ 80	50 ÷ 150	78
KTH	3.65	1.4	70	750 ÷ 1750	40 ÷ 78	100 ÷ 200	22
Total	3.65 ÷ 6	1.0 ÷ 1.4	30 ÷ 90	500 ÷ 3000	16 ÷ 80	50 ÷ 200	100

Testy Adiabatyczne

- **Hewitt-Pulling**
 - 2.4 – 4.5 [bar]
 - Quality 15 – 75
 - 297 kg/m²/s
 - L = 3.67 [m]
 - 70 Runs
- **Komentarz**
 - Duże niedoszacowania modelu Okawa.
 - Problemy ze zbieżnością.

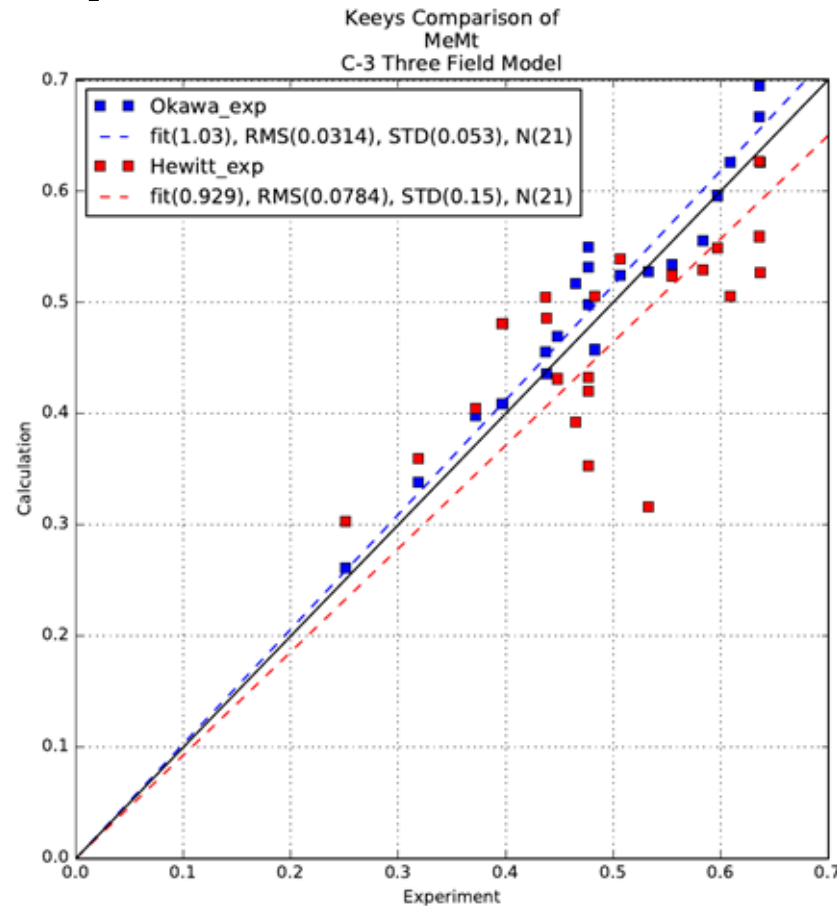
$$\frac{M_e}{M_t} = \frac{M_e}{M_{film} + M_{vapour} + M_{droplets}}$$



Testy Adiabatyczne

- **Keys**
 - 35 – 79 [bar]
 - Quality 14 – 68
 - 1350 – 2760 kg/m²/s
 - L = 3.66 [m]
 - 21 runs
- **Komentarz**
 - Okawa daje mniejszy rozrzut wyników.

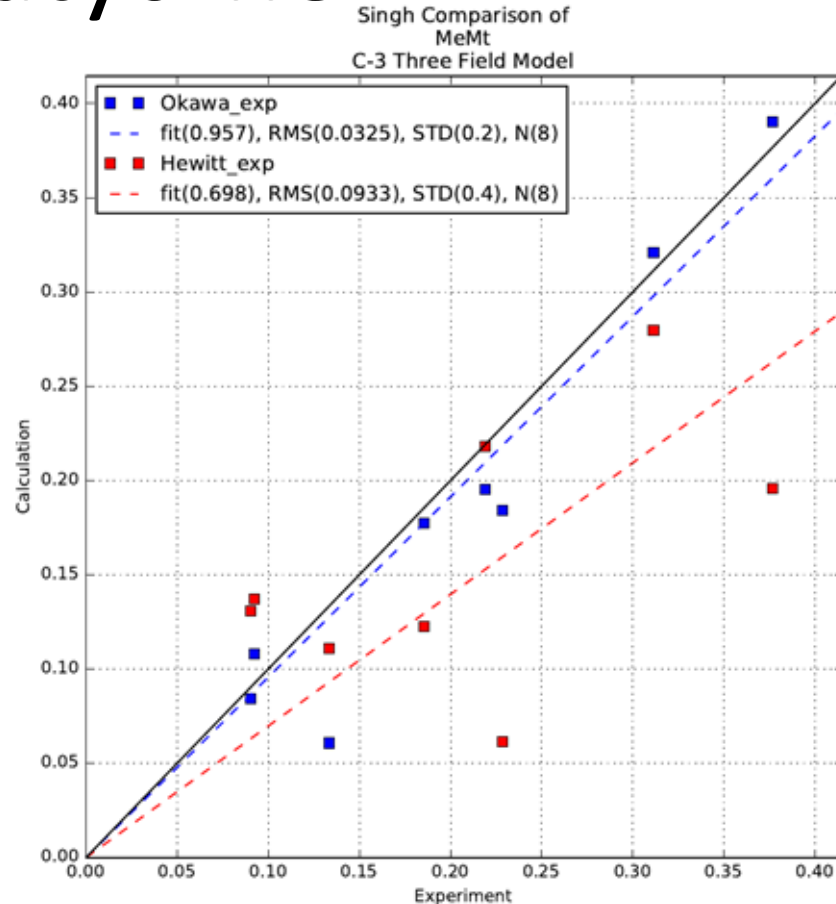
$$\frac{M_e}{M_t} = \frac{M_e}{M_{film} + M_{vapour} + M_{droplets}}$$



Testy Adiabatyczne

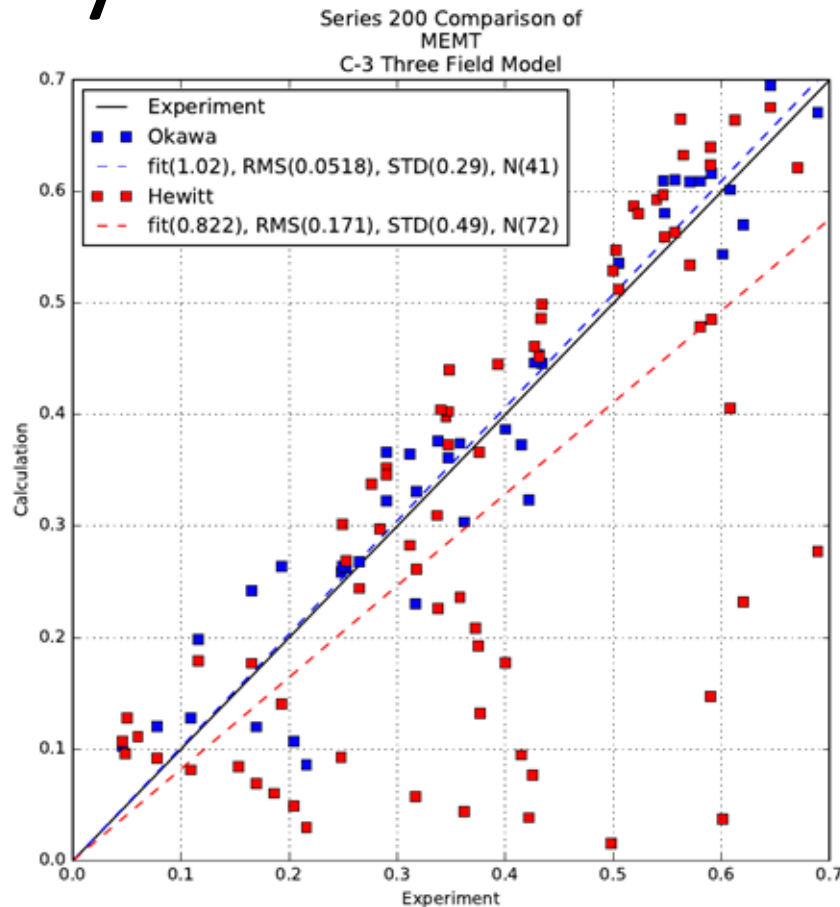
- **Singh**
 - 69 bars
 - Quality 30 – 81
 - 540 – 950 kg/m²/s
 - L = ~2.5 [m]
 - 8 Runs
- **Komentarz**
 - Okawa daje znacznie lepsze wyniki

$$\frac{M_e}{M_t} = \frac{M_e}{M_{film} + M_{vapour} + M_{droplets}}$$



Testy Adiabatyczne

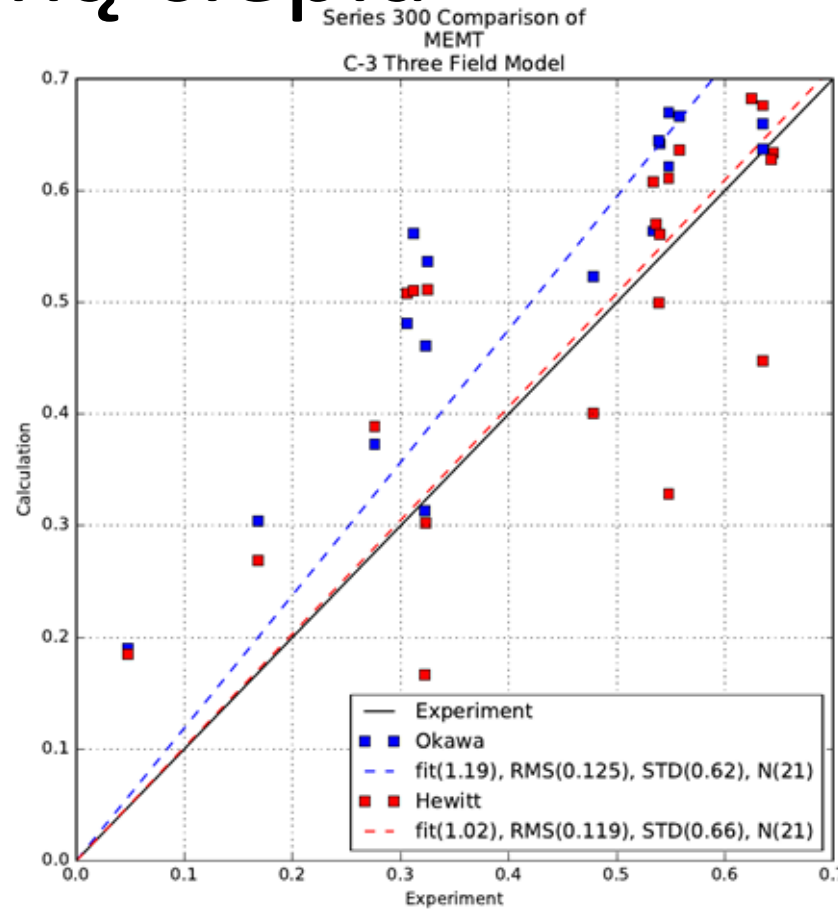
- **Wurtz 200**
 - 30 – 90 bar
 - Quality 8 – 60
 - 500 – 3000 kg/m²/s
 - $L = 9$ [m]
 - 71 runs
- **Komentarz**
 - Problemy ze zbieżnością
 - Wysoki rozrzut wyników dla modelu H-G (domyślny C-3).



Testy z wymianą ciepła

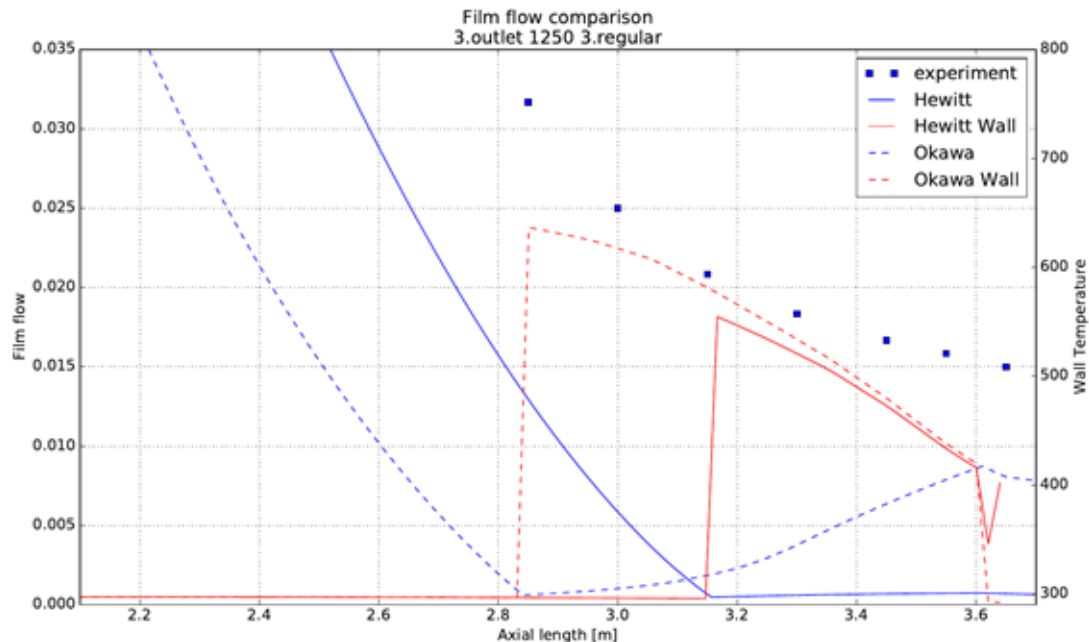
- **Wurtz 300**
 - 70 bars
 - Quality 16 – 80
 - 0.5 – 1.5 MW/m²
 - 500 – 3000 kg/m²/s
 - L = 4.01 [m]
 - 21 runs
- **Komentarz**
 - Przeszacowanie ilości kropeł
 - Dobre wyniki HG jednak z wysoki rozrzutem.

$$\frac{M_e}{M_t} = \frac{M_e}{M_{film} + M_{vapour} + M_{droplets}}$$



Testy z wymianą ciepła

- KTH FilmFlow
 - 70 bars
 - Quality 40 – 78
 - 1 – 2 [MW/m²]
 - 750, 1250, 1750 [kg/m²/s]
 - 22 Runs
- Komentarz
 - Efekt dryout występuje za szybko względem eksperymentu
 - Za mały przepływ „filmu”
 - Za duże odrywanie
 - Za mała depozycja



Udoskonalenia

- Przepływy adiabatyczne
 - Modyfikacja modelu grubości warstwy przyściennej
 - Model osadzania „Sugawara” dla warunków
 - ciśnienie < 5 bars
 - and
 - Wsp. suchości pary > 0.25
 - Wurtz 600 – dodatkowy eksperyment

Grubość filmu

- Wallis

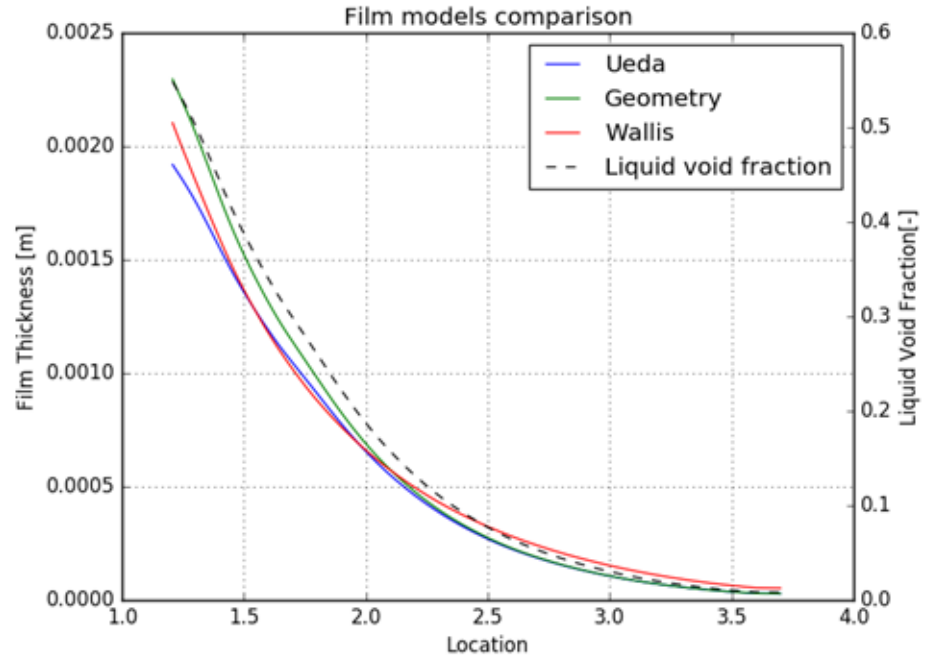
$$\delta = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{f_w \rho_l J_f}{f_i \rho_v J_g}} \cdot D_h$$

- Ueda

$$y_{im} = A_l \cdot \frac{D_h}{4}$$

- Geometria

$$\delta = \frac{D_h}{2} \left(1 - \sqrt{1 - A_l} \right)$$



Thickness model	time[min]	MeMt [-]	Film Velocity $\frac{m}{s}$
Ueda	39.4	0.69117128	7.7197046
Wallis — corrected	46.8	0.69201936	7.4423156
Hewitt-Govan	0.1	0.61136967	9.5595589
“Old Wallis”	49.1	0.69201929	7.442318
Geometry	34.3	0.69173845	7.8558831

Sugawara

- Autor modelu „Okawa” w swojej publikacji sugerował aby dla przypadków ciśnienia **mniejszego niż 5 bar oraz wsp. suchości większego niż 0.25**, powinien być zastosowany model osadzania Sugawara.

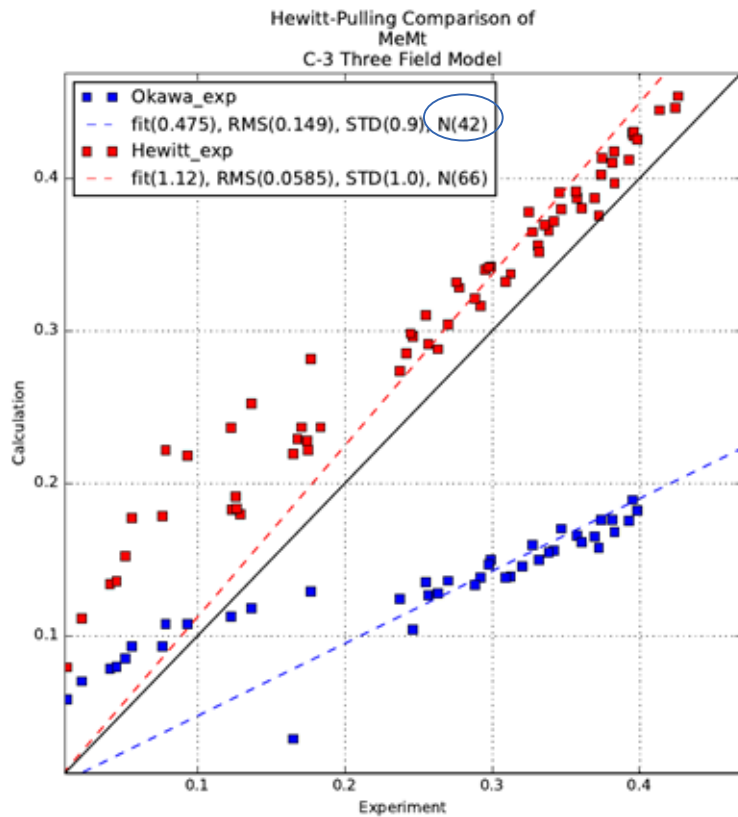
$$\frac{k_D}{J_G} = 9.0 \cdot 10^{-3} \left(\frac{C}{\rho_G} \right)^{-0.5} Re_G^{-0.2} \cdot Sc^{-2/3} \quad Re_G = \frac{u_g D_h \rho_g}{\mu_g} \quad Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_G}$$

- Zmiana modelu grubości filmu usunęła ograniczenie dla stosunku prędkości pary i wody.

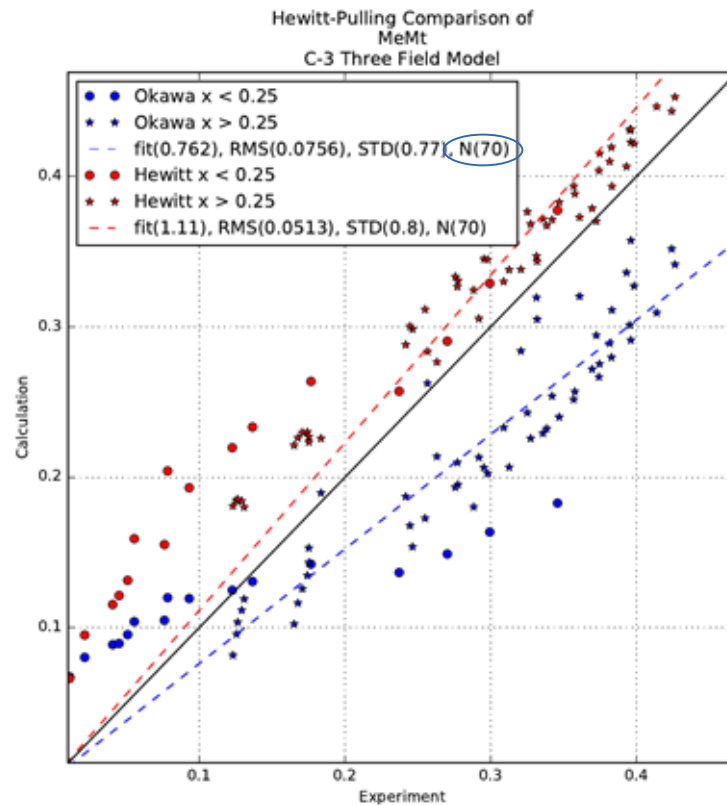
$$\frac{J_l}{J_g} = 0.00114242$$

Hewitt-Pulling

- Początkowe

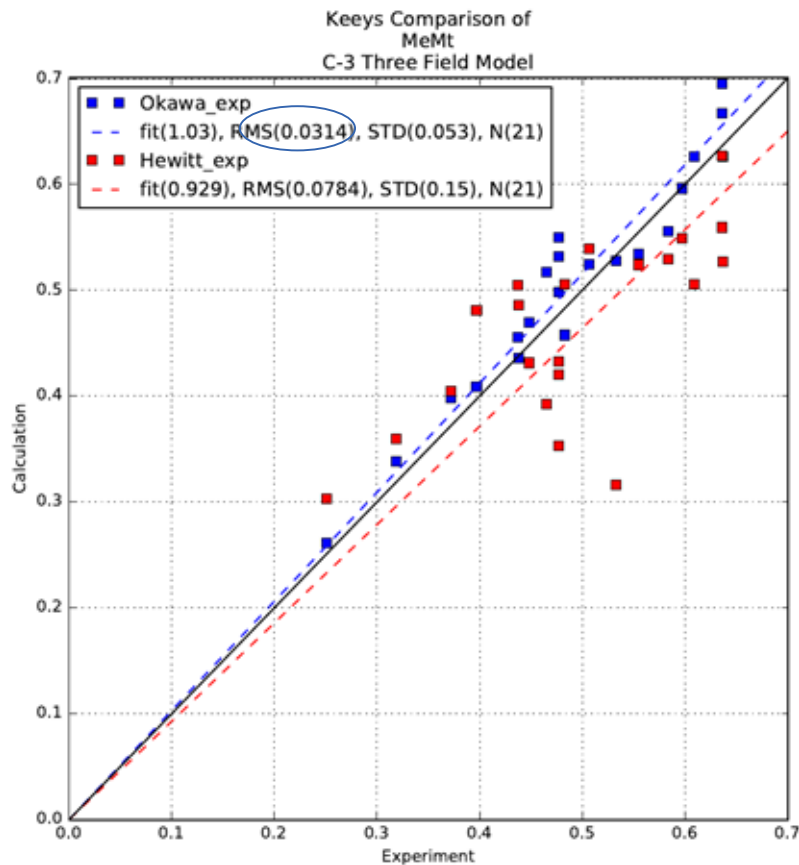


Ostateczne

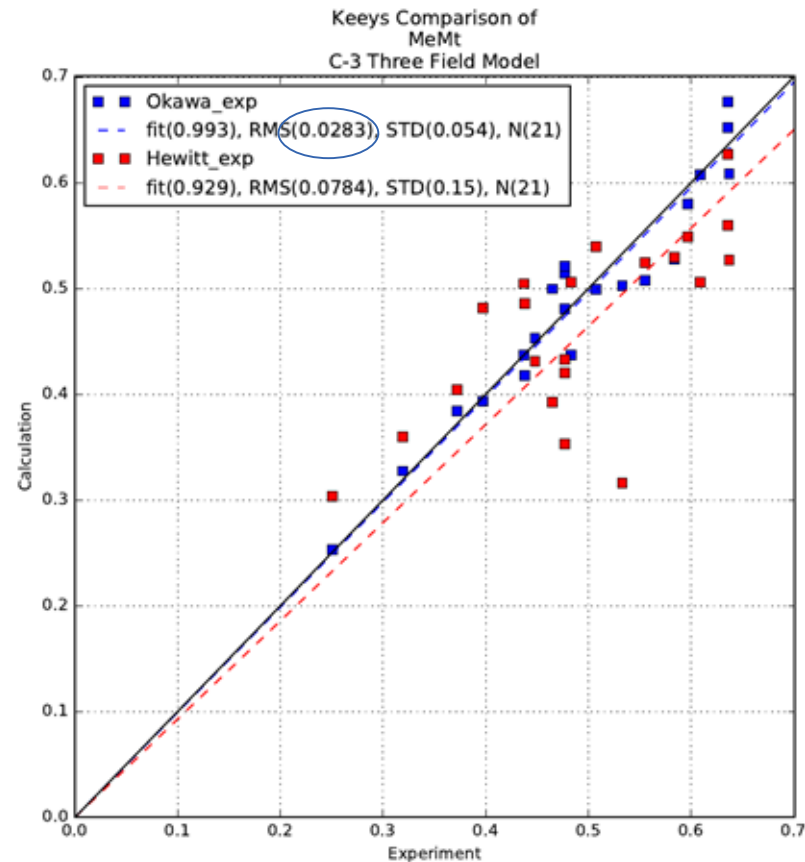


Keys

- Początkowe

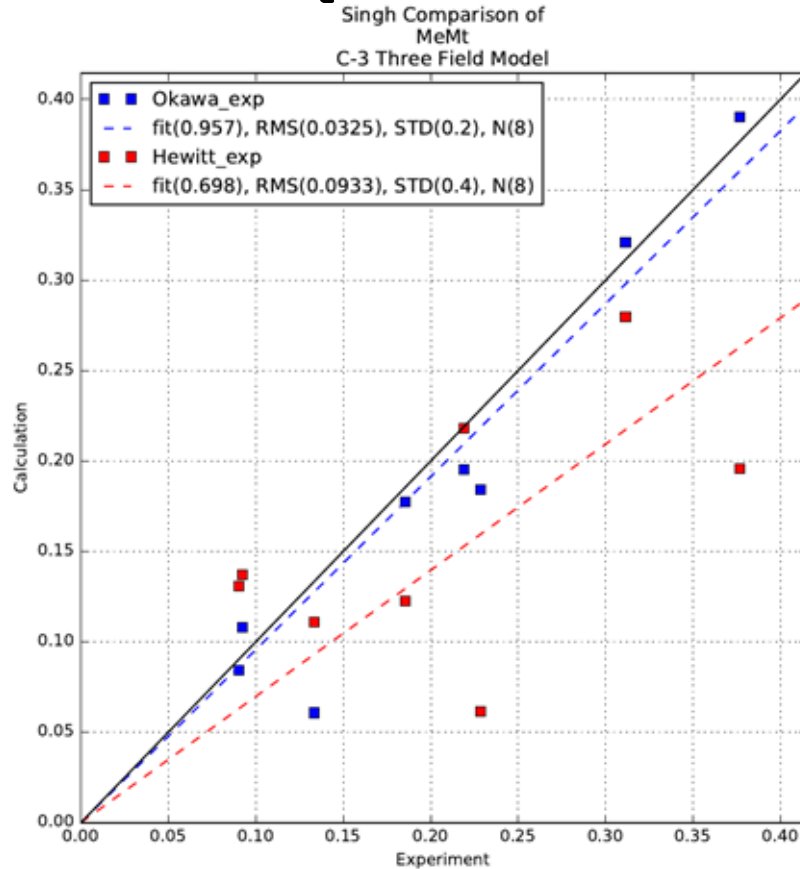


Ostateczne

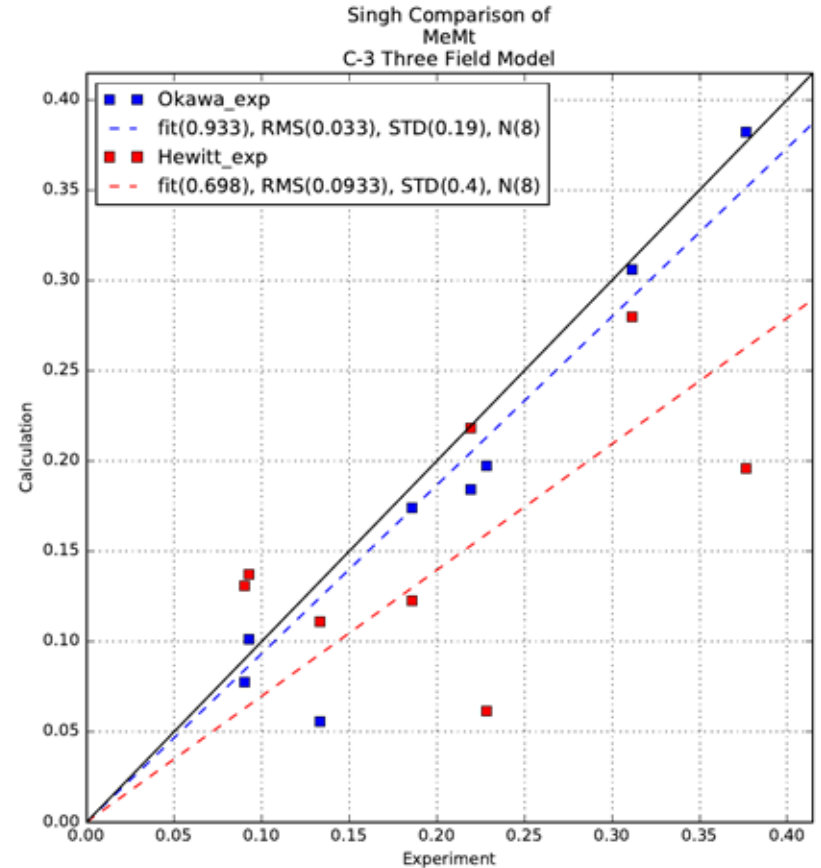


Singh

- Początkowe

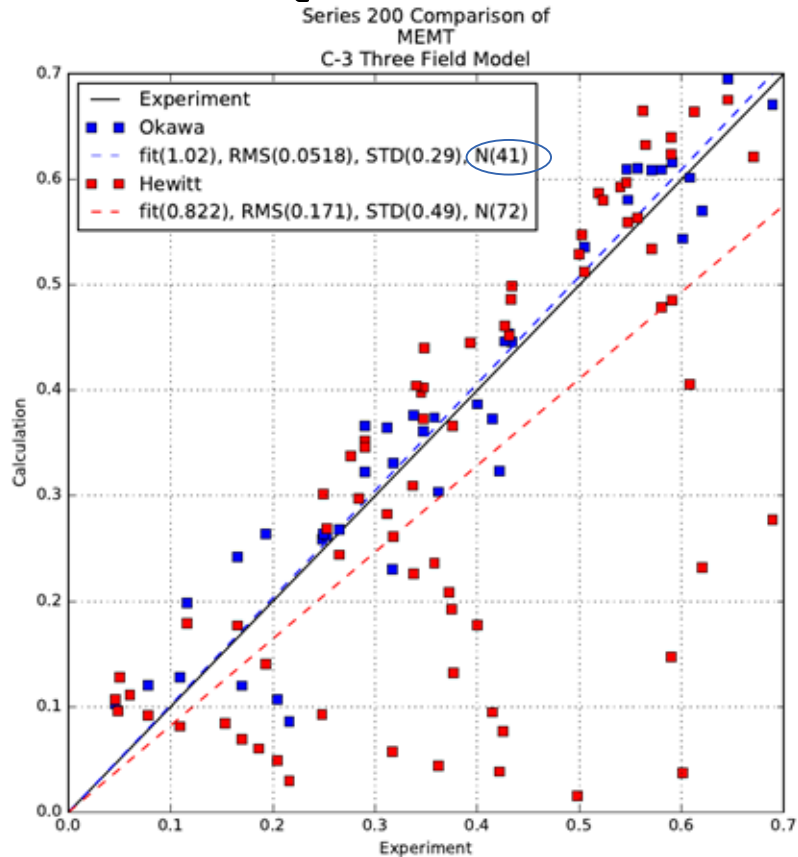


Ostateczne

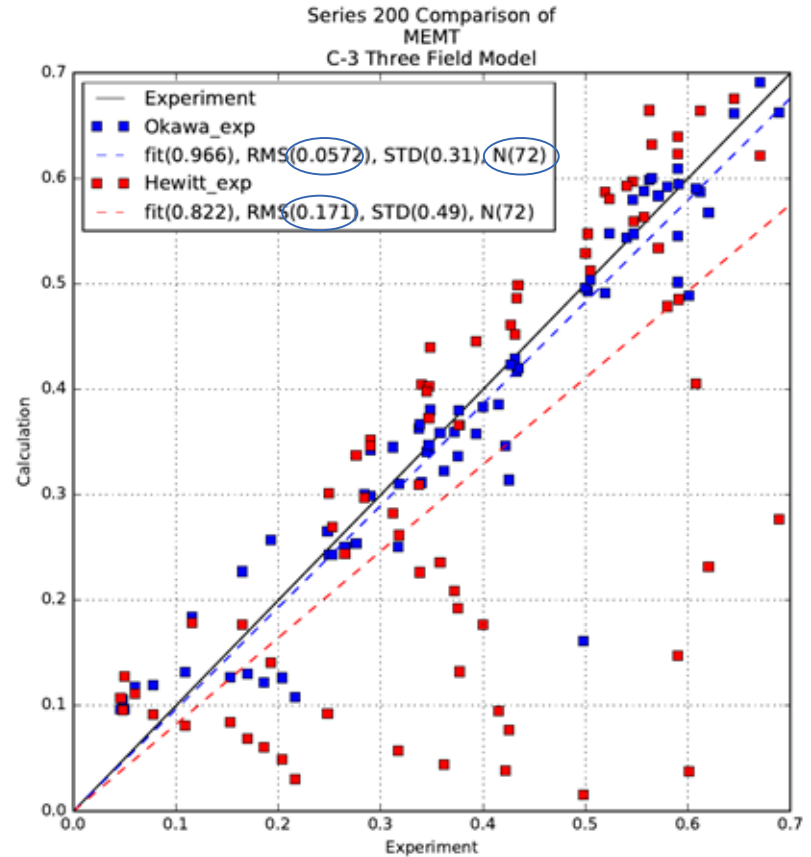


Wurtz 200

- Początkowe



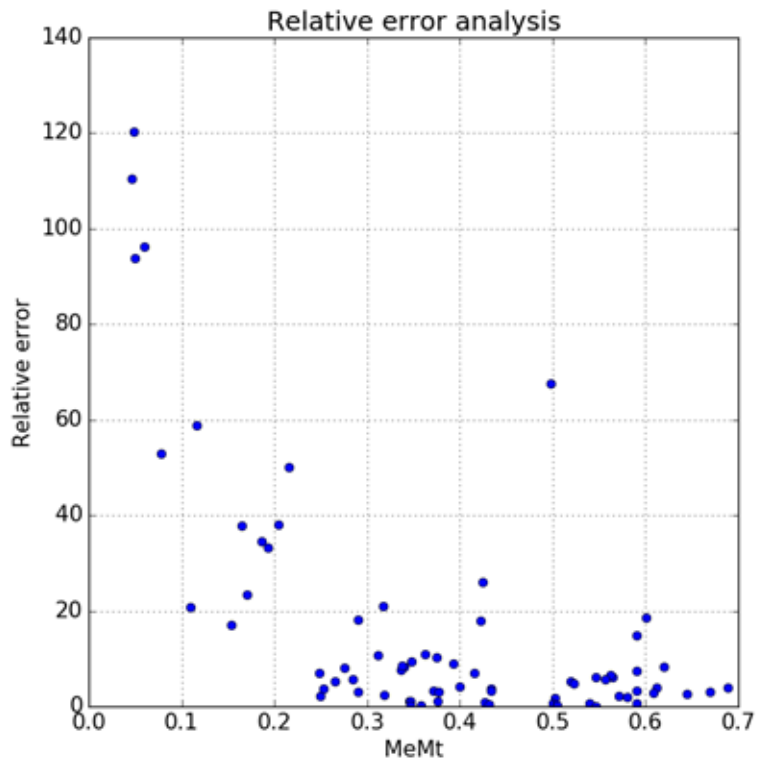
Ostateczne



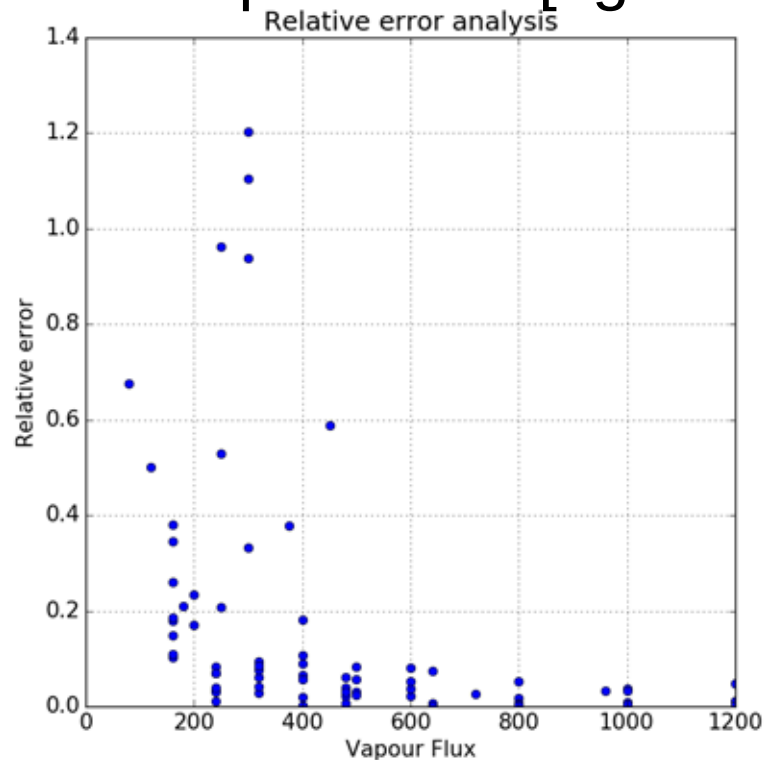
Wurtz 200

(Okawa) Relative Error Analysis

MeMt

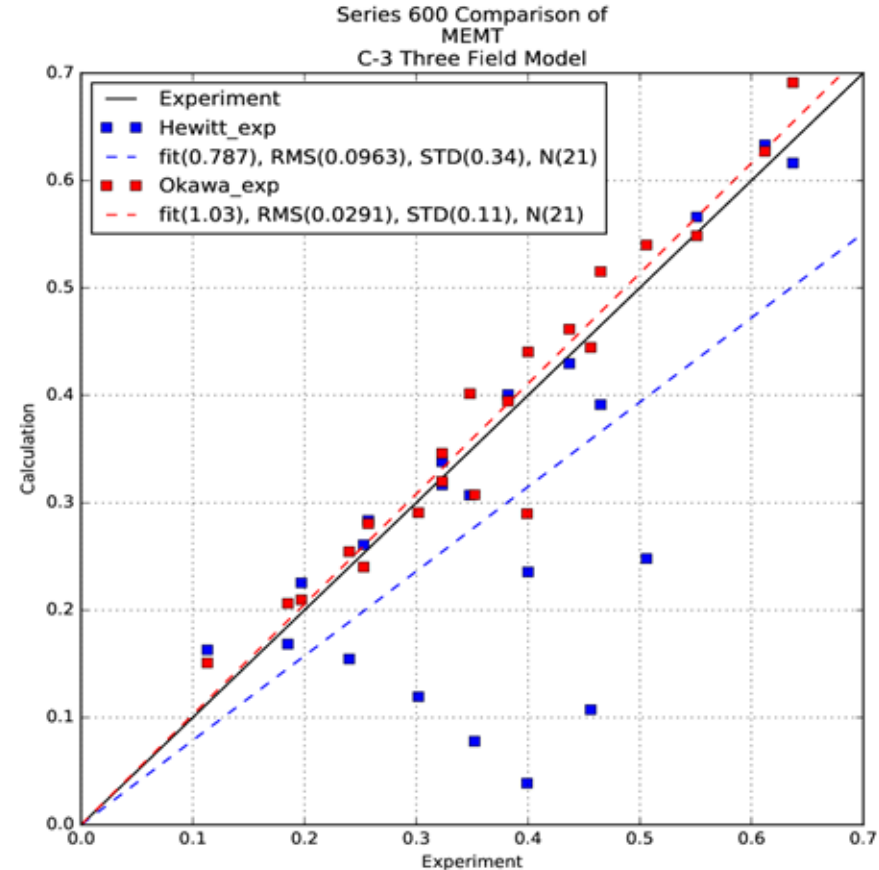


Vapour Flux [kg/m²/s]



Wurtz 600

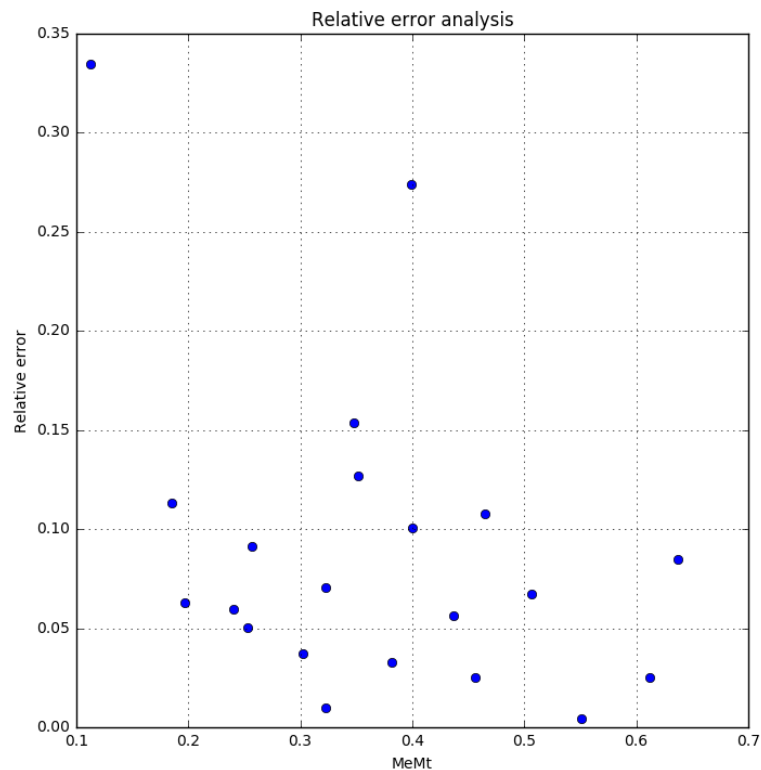
- 70 bars
- Quality 20 – 70
- 500 – 2000 [kg/m²/s]
- Hydraulic Diameter = **0.02** [m]
- Komentarz:
 - Okawa daje wyniki o dużej dokładności.



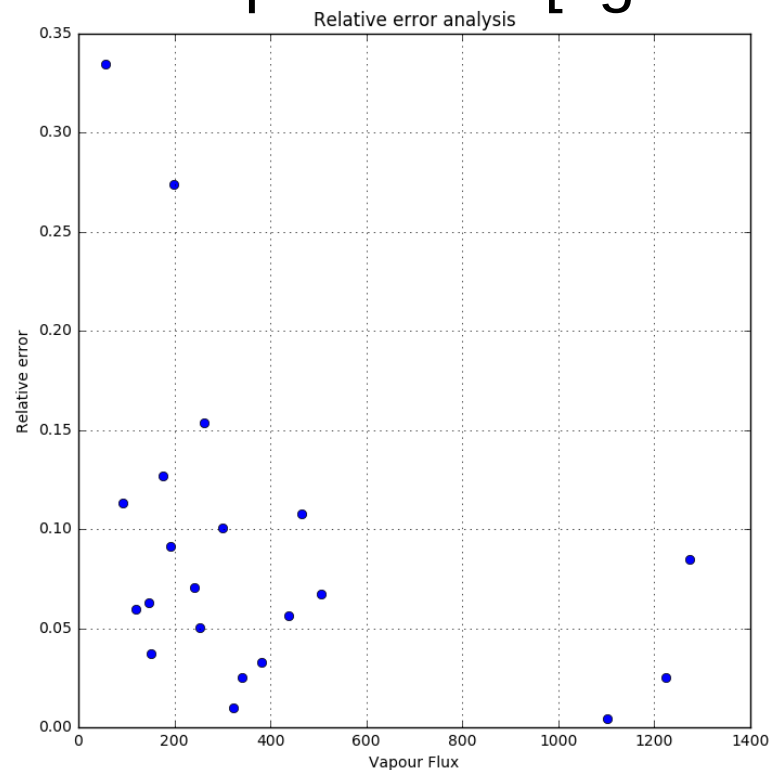
Wurtz 600

(Okawa) Relative Error Analysis

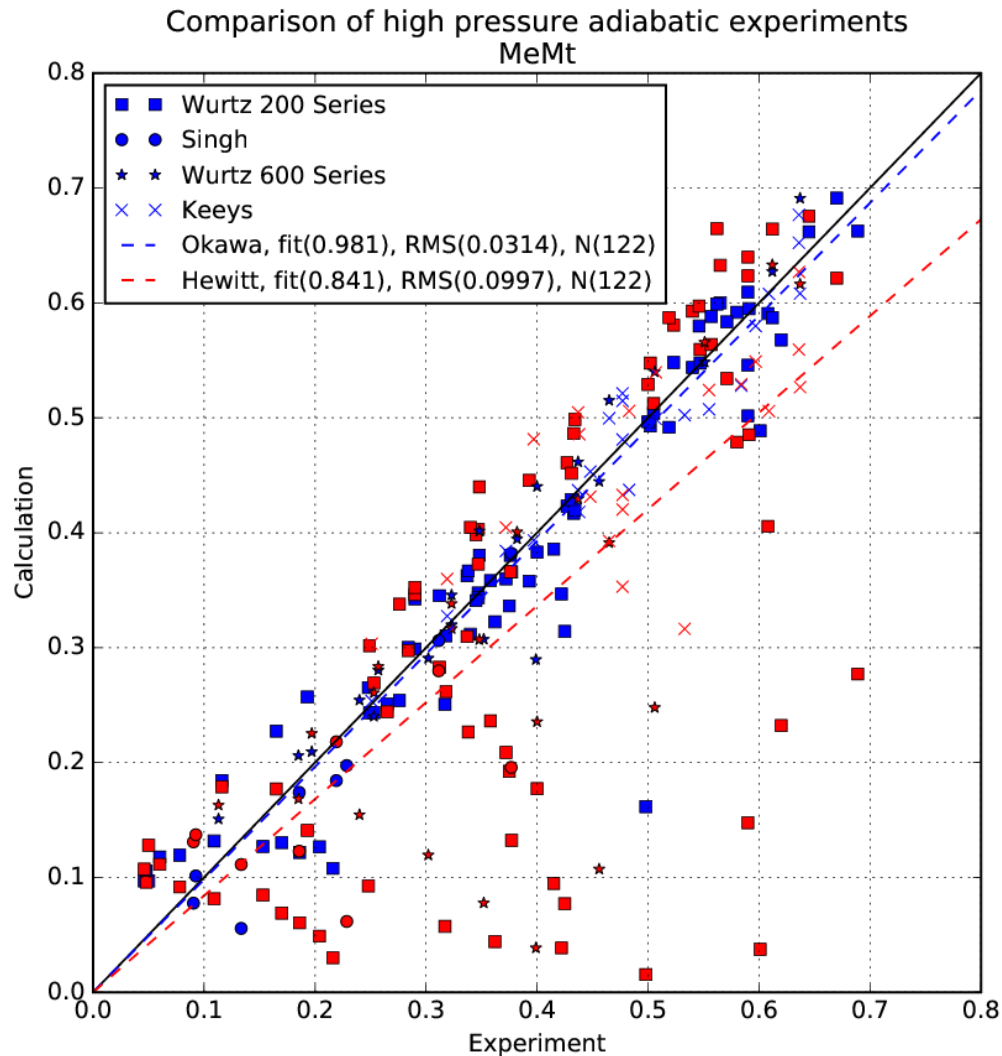
MeMt



Vapour Flux [kg/m²/s]



Porównanie zbiorcze eksperymentów adiabatycznych

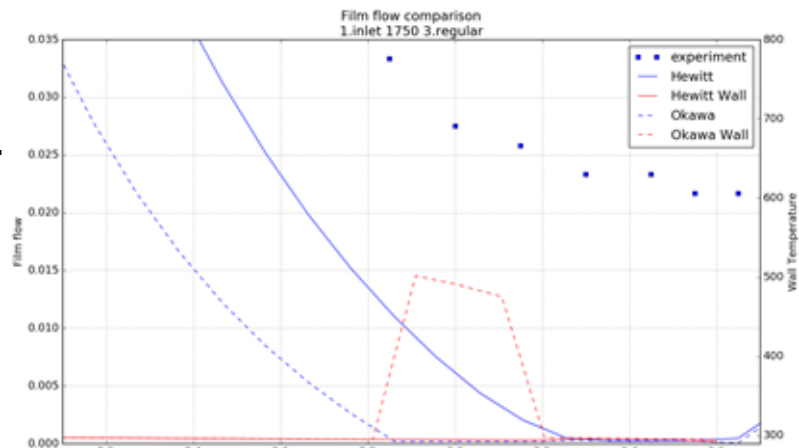


Udoskonalenia

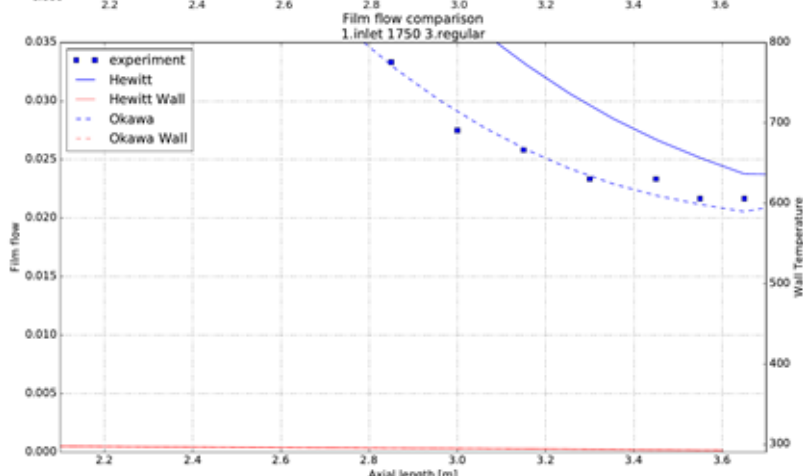
- Przepływy z wymianą ciepła
 - Kryterium na przepływ pierścieniowy Wallisa
 - Wyłączenie efektów związanych z wrzeniem
 - Odrywanie kropelek (Ueda)
 - Hamowanie osadzania (Hoyer)
 - Initial Entrainment Fraction.
 - Rozszerzenie eksperymentu Wurtz 300.

Dlaczego wyłączono efekty zw. Z wrzeniem i waga IEF

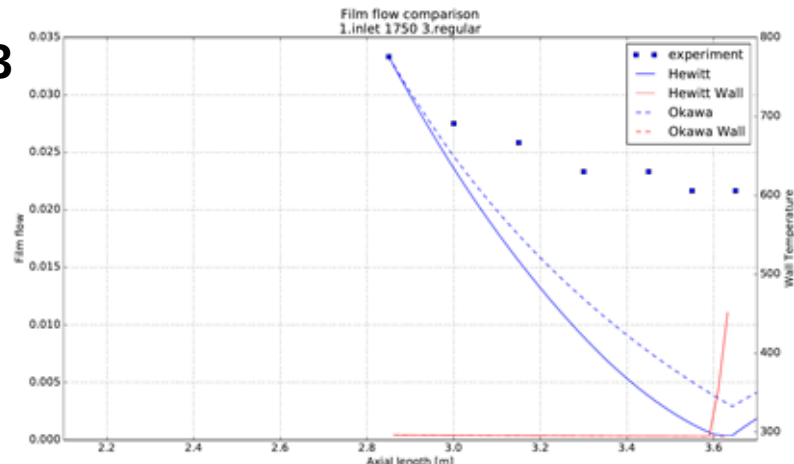
1



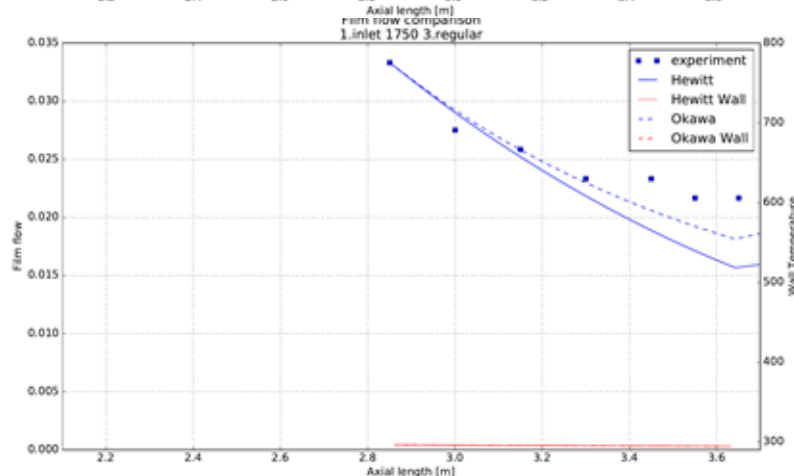
2



3

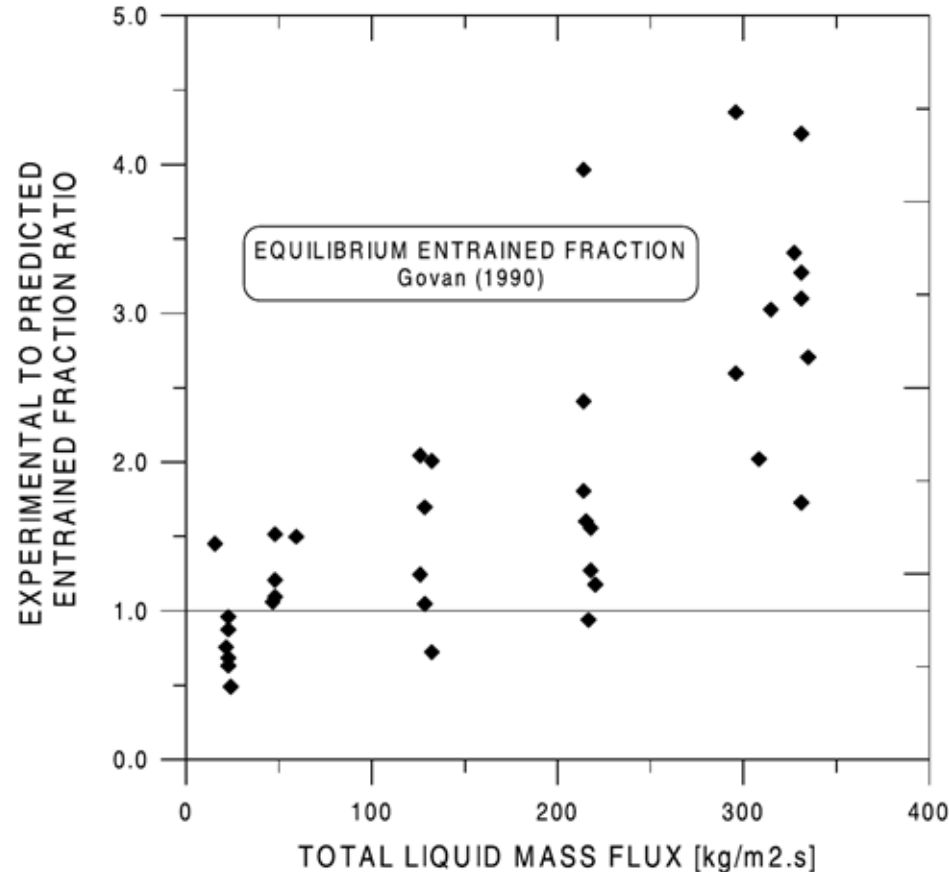


4



Equilibrium

- Fig on the right shows a comparison between entrained fraction calculated by the equilibrium approach (using the entrainment and deposition correlations of Govan, 1990) and the actual values measured in the present investigation. As will be seen, there are considerable differences between the measured values and those calculated assuming annular flow equilibrium.
- Barbosa, 2002



Initial Entrained Fraction

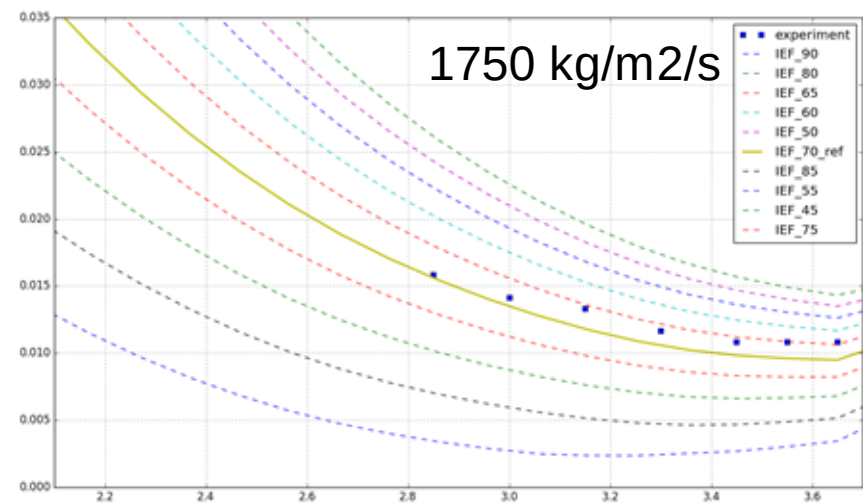
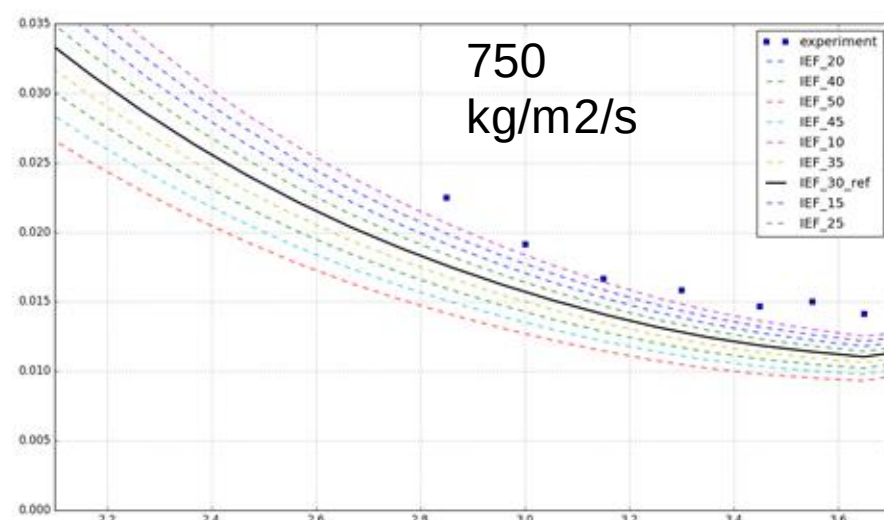
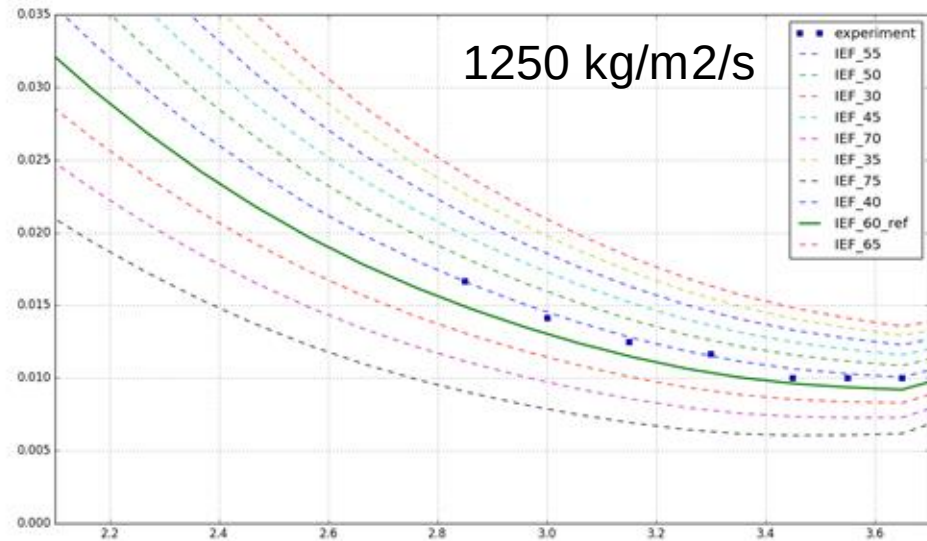
- After establishing proper set of models for Entrainment and deposition rates, an initial value of **0.5 for IEF was used**. The first observation was, that for low mass flux, the CHF was underestimated, and for high mass flux flow, CHF was overestimated. That lead to development of the following empirical IEF formulation.

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

$$IEF = \frac{0.1266461 \cdot G - 60.3850122}{G \cdot x_{tr}} \quad \text{for} \quad 500 < G < 1800$$

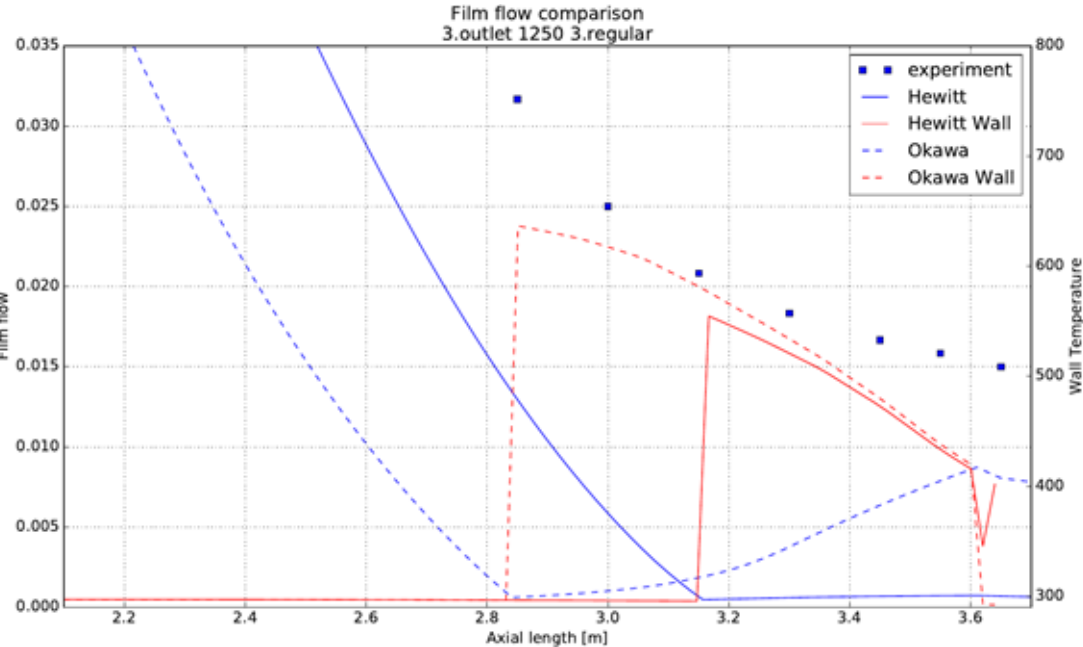
$$IEF = 0.75 \quad \text{for} \quad 1800 < G$$

$$x_{tr} = \frac{0.6 + 0.4 \cdot \sqrt{\rho_l(\rho_l - \rho_g)gD_h/G}}{0.6 + \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}}$$

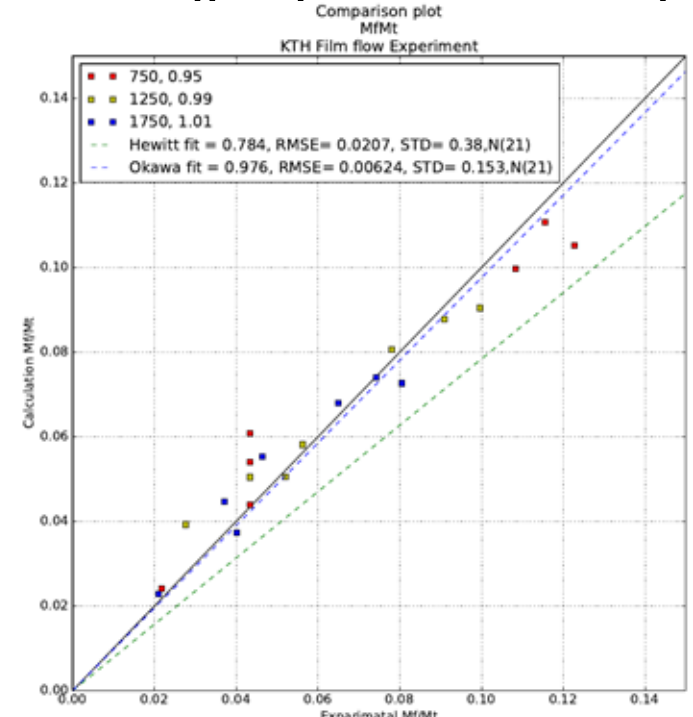


KTH

- **Przed zmianami**
- 4 Zjawiska
- $IEF = 0$

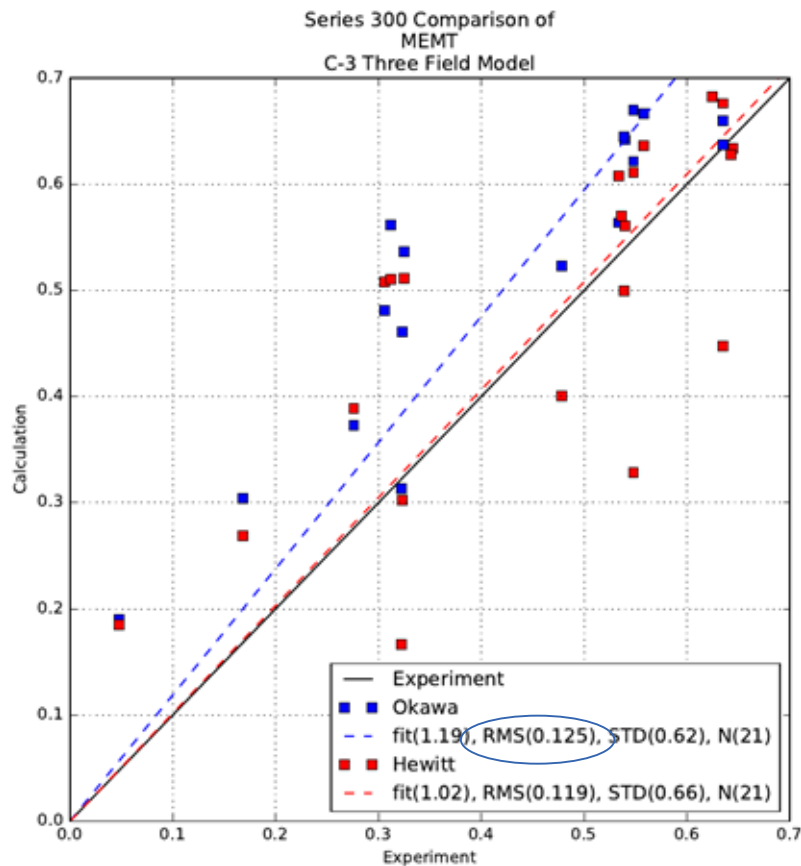


- **Po zmianach**
- 2 zjawiska
- $IEF = (\text{proposed model})$

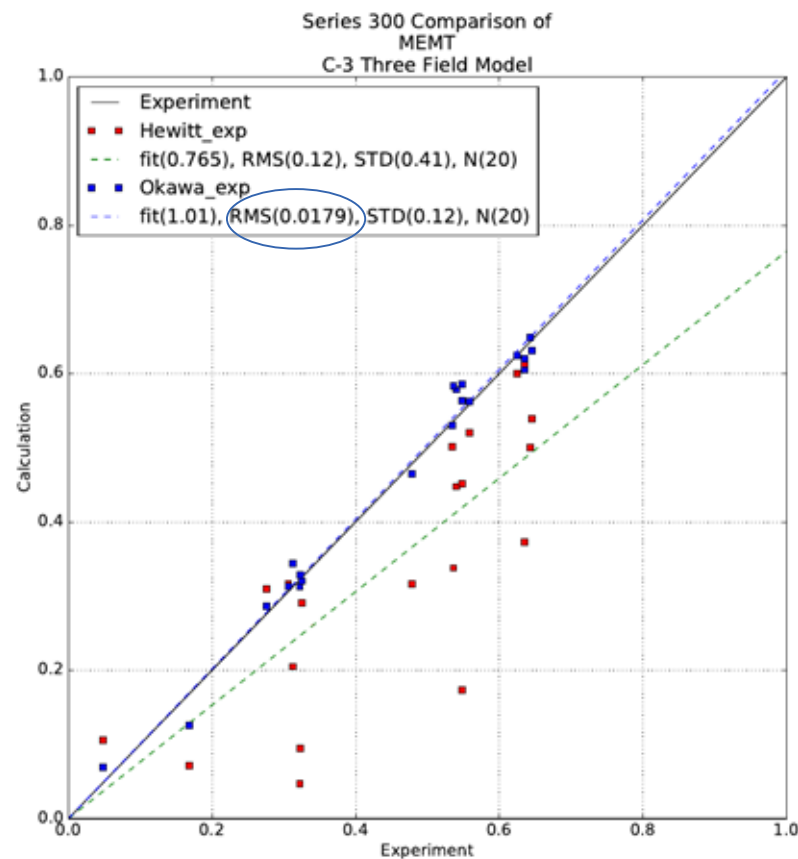


Wurtz 300

• Przed zmianami

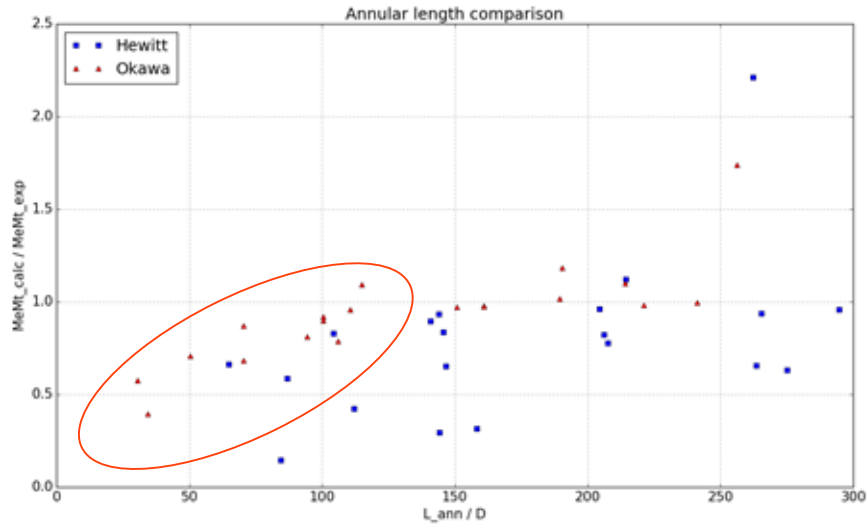


Po zmianach

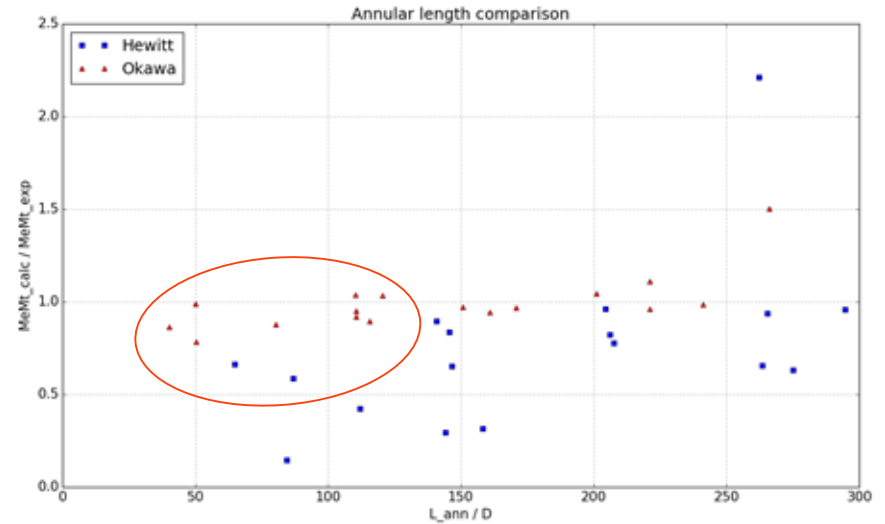


Wurtz 300

IEF = 0

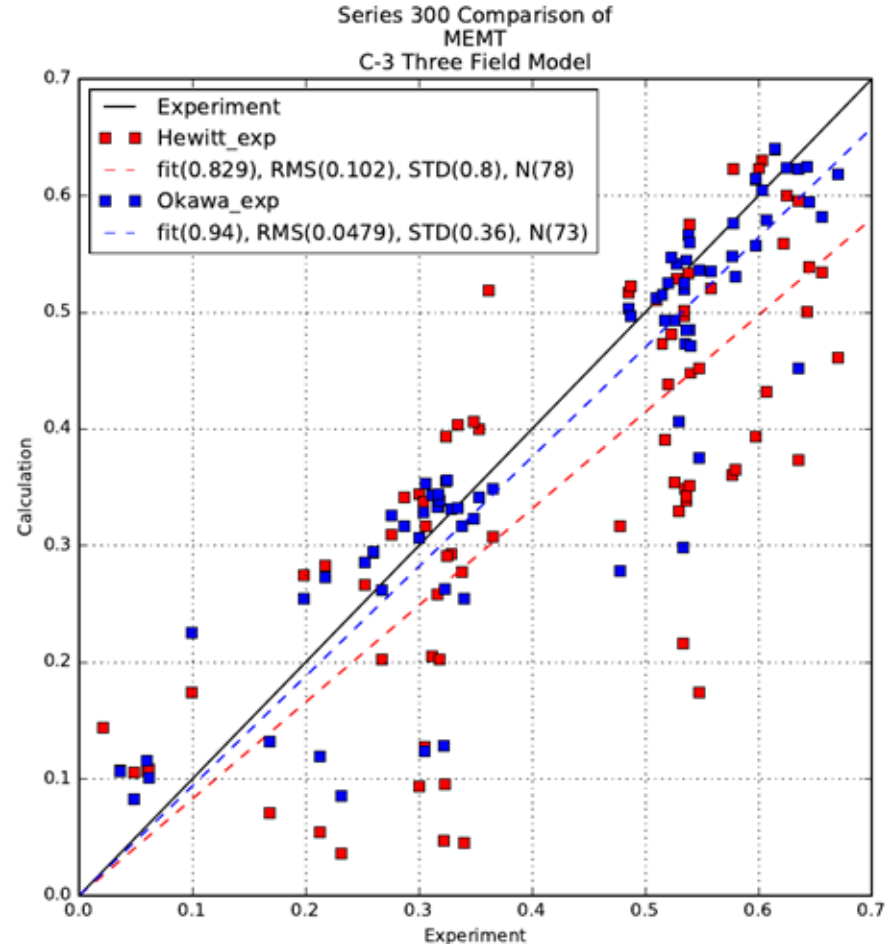


Wraz z korelacją na IEF



Wurtz 300 – extended

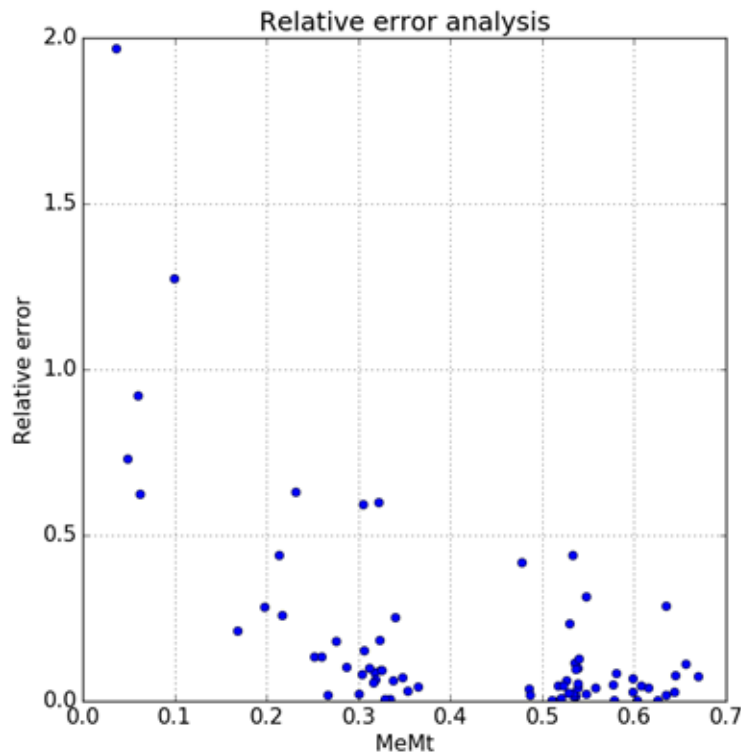
- 30 – 90 [bar]
- Quality 16 – 80
- 0.5 – 1.5 [MW/m²]
- 500 – 3000 [kg/m²/s]
- 78 runs
- **IEF = 0.0**
- **Komentarz**
 - Podobne efekty jak poprzednio
 - Okawa lepsza dokładność, mniejszy rozrzut



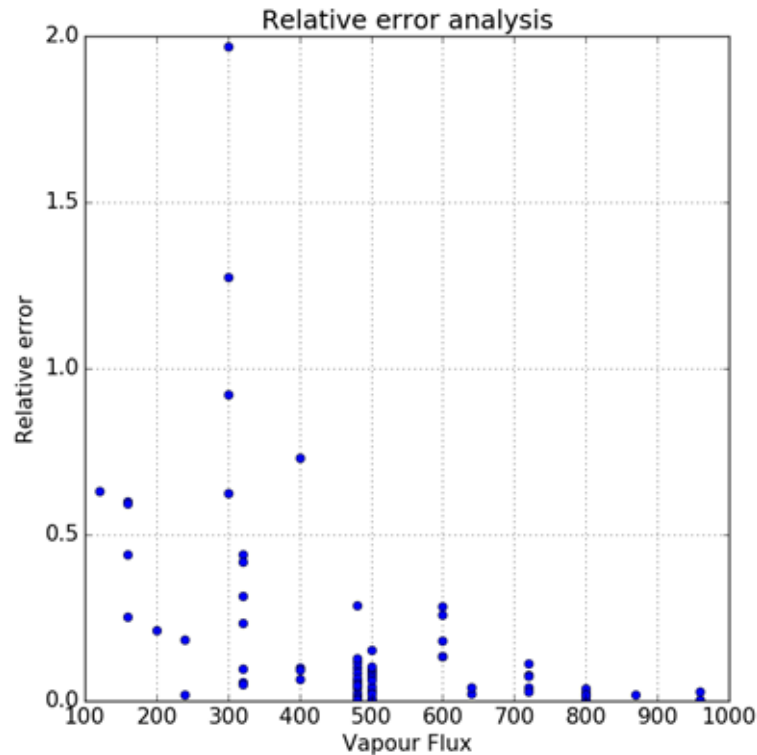
Wurtz 300

(Okawa) Relative Error Analysis

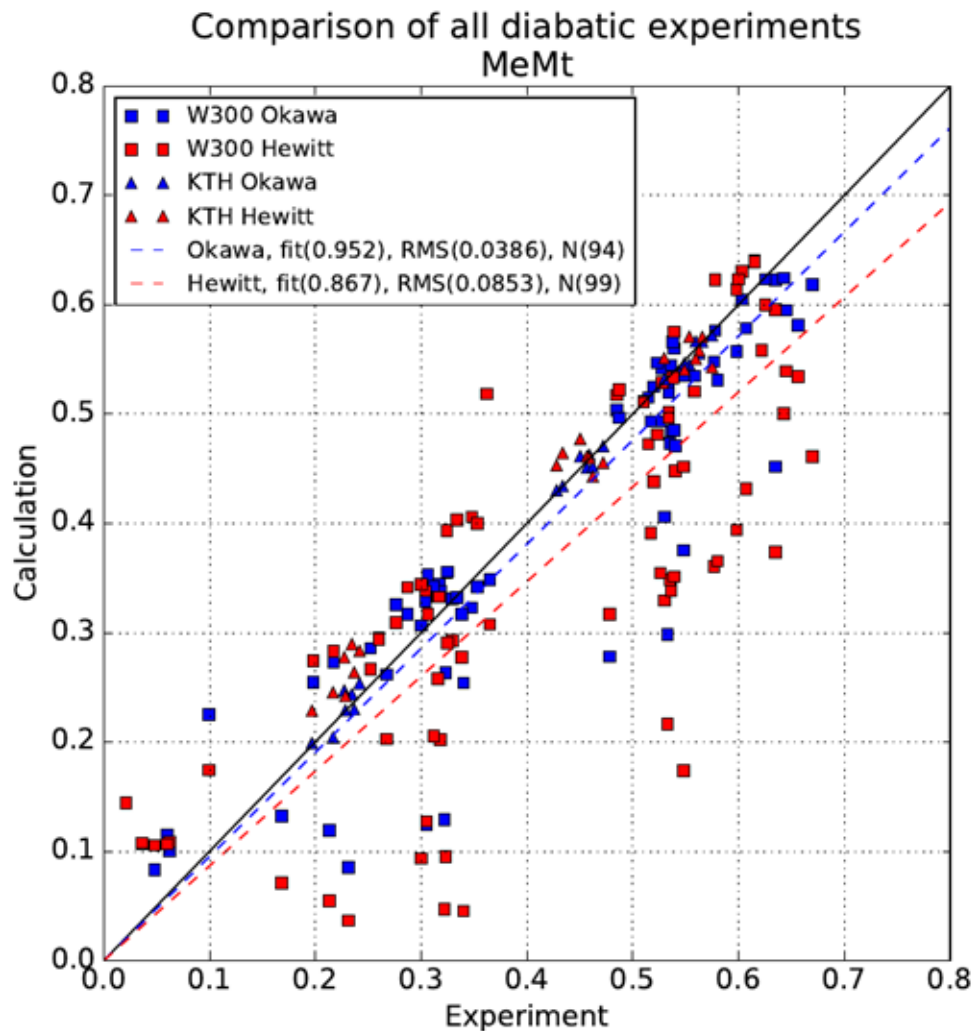
MeMt



Vapour Flux [kg/m²/s]



Porównanie zbiorcze eksperymentów w z wymianą ciepła



Ostatecznie

- Annular flow criterion – **Wallis**
- Entrainment-deposition rates
(without effects of boiling)
 - High pressure($P > 5$ bar) – **Okawa**
 - Low pressure ($P < 5$ bar) – **Hewitt-Govan**
- Initial Entrainment Fraction – proposed model (**Spirzewski**)

Podsumowanie

Experiment	Model	Fitting coefficient		Root mean square error		σ		Converged	
------------	-------	---------------------	--	------------------------	--	----------	--	-----------	--

Adiabatic tests

Hewitt-Pulling	Okawa	0.47	0.762	0.148	0.0756	0.9	0.77	44(70)	70
	Hewitt-Govan	1.12	1.11	0.0585	0.0513	1.0	0.8	66(70)	70
Keays	Okawa	1.03	0.993	0.0314	0.0283	0.053	0.54	21	21
	Hewitt-Govan	0.929	0.929	0.0784	0.0784	0.15	0.15	21	21
Singh	Okawa	0.957	0.933	0.0325	0.033	0.2	0.19	8	8
	Hewitt-Govan	0.698	0.698	0.0933	0.0933	0.4	0.4	8	8
Wurtz 200	Okawa	0.989	0.966	0.071	0.0572	0.19	0.31	52(72)	72
	Hewitt-Govan	0.834	0.822	0.161	0.171	0.2	0.49	71(72)	72
Wurtz 600	Okawa		1.42		0.178		0.34		21
	Hewitt-Govan		1.4		0.172		0.37		21
Combined	Okawa		0.984		0.0607				192
	Hewitt-Govan		0.97		0.0879				192

Diabatic tests

KTH	Okawa		0.976		0.00624		0.153		33
	Hewitt-Govan		0.784		0.0207		0.38		33
Wurtz 300	Okawa	1.03	1.01	0.0761	0.0179	0.18	0.12	21	20
	Hewitt-Govan	0.929	1.02	0.131	0.119	0.2	0.66	21	21
Wurtz 300 (ext)	Okawa		0.94		0.0479		0.36		73
	Hewitt-Govan		0.829		0.102		0.8		78
Combined	Okawa		0.952		0.0386				94
	Hewitt-Govan		0.867		0.0853				99

Konkluzje

- Testy adiabatyczne
 - Okawa przewiduje lepsze wyniki z mniejszym rozrzutem niż domyślny model Hewitt-Govan.
- Testy z wymiana ciepła
 - Efekty w wyniku wrzenia nie powinny być na razie brane pod uwagę.
 - Warunek początkowy (IEF) odgrywa bardzo istotną rolę wraz z rosnącym strumieniem masy.

Dalsza praca

1) Initial Entrained Fraction

- a) Lepsza implementacja tego „zjawiska” - na ten moment jest to zaimplementowane w plikach „entrainment’u”.
- b) Implementacja zjawiska odrywania w przepływie „churn-turbulent” (IEF jest skutkiem tego przepływu)
- c) Porównanie innych modeli na IEF
- d) Praca w kierunku mniejszej „empiryczności” modelu.

2) Analiza zagadnienia w geometri pręta oraz pęczka prętów

3) Zanalizowane innych „wariacji” modeli Okawa/Hewitt-Govan

4) Odtworzenie wyników w autorskim oprogramowaniu (DARIA)

Dziękuję za państwa uwagę

Michał Spirzewski