

## Nowe urządzenie do montażu izolacji cieplnej kanałów wentylacyjnych

**Streszczenie.** Montaż izolacji cieplnej kanałów wentylacyjnych odbywa się najczęściej przy wykorzystaniu specjalnych trzpieni wyposażonych w klipsy. Trzpień te są mocowane do powierzchni kanału poprzez zgrzewanie na skutek wyładowania elektrycznego i bezpośredniego przepływu prądu przez styk trzpień – powierzchnia kanału. Technika ta, mimo niewątpliwych zalet, charakteryzuje się wieloma cechami negatywnymi, jak wysoka energochłonność oraz znaczna liczba defektów wywołanych przepaleniem ściany kanału. W niniejszym artykule zaprezentowano nowe rozwiązanie w tej dziedzinie, polegające na wykorzystaniu klejenia trzpieni do powierzchni kanału. Na podstawie omówionych wielowariantowych analiz numerycznych, wyznaczono zakres prądów oraz częstotliwości, gwarantujących uzyskanie racjonalnych pól temperatury w obszarze roboczym. Wyniki te wykorzystano do opracowania modelu urządzenia grzejnego. Omówiono rezultaty pomiarów modelu oraz możliwości wykorzystania proponowanych rozwiązań w warunkach przemysłowych.

**Abstract.** The paper describes numerical analysis of influence of assembly faults in MV cable termination on the electric field distribution. These faults, like uncorrectly stripped cable insulation, irregular shrinking or omitted stress control mastic, could drastically decrease cable equipment lifetime. (New device for thermal insulation mounting).

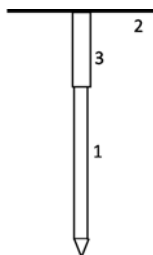
**Słowa kluczowe:** montaż izolacji cieplnej, symulacja, badania.

**Keywords:** tests, modelling and simulation.

### Wstęp

Montaż izolacji cieplnej kanałów wentylacyjnych odbywa się najczęściej przy wykorzystaniu specjalnych trzpieni wyposażonych w klipsy (rys. 1). Zazwyczaj elementy te wykonywane są ze stali pokrytej cienką warstwą miedzi. Trzpień są mocowane do powierzchni kanału poprzez zgrzewanie na skutek wyładowania elektrycznego i bezpośredniego przepływu prądu przez styk trzpień – powierzchnia kanału. Technika ta, mimo niewątpliwych zalet, charakteryzuje się następującymi cechami negatywnymi, wynikającymi z jej zasad oraz stosowanego sprzętu:

- znaczna energochłonność, wynikająca z konieczności dostarczenia energii umożliwiającej stopienie stalowych trzpieni;
- duże straty ciepłe wynikające z przepływu znacznych prądów (często powyżej 1 kA);
- konieczność stosowania przewodów oraz elementów wiodących prąd o znacznych przekrojach, co skutkuje znaczną masą urządzeń grzejnych oraz brakiem wygody ich wykorzystywania;
- ograniczona powtarzalność rezultatów zgrzewania, wynikająca z braku możliwości kontroli dostarczanej energii przy bardzo dużej szybkości nagrzewania.



Rys. 1. Badany trzpień izolacyjny: 1-pręt stalowy pokryty miedzią  $\Phi=2,8$  mm, 2-klips elektroda, 3-tulejka PCV

Z uwagi na zaprezentowane negatywne cechy stosowanej technologii, w niniejszej pracy zweryfikowano możliwość montażu opisywanych trzpieni przy użyciu kleju termoaktywnego. Klej powinien w możliwie szybkim czasie uzyskać konsystencję płynną w okolicy styku gwoźdźca z powierzchnią kanału. Proces zastygania kleju powinien również być możliwie krótki. Dzięki zastosowaniu tej technologii, przewiduje się następujące zalety (w

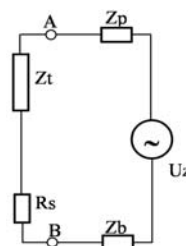
porównaniu do wykorzystywanej powszechnie technologii zgrzewania):

- energooszczędność wynikająca z znacznie niższej temperatury wykorzystywanej w procesie montażu izolacji termicznej;
- zmniejszenie gabarytów urządzeń grzejnych wynikająca z wykorzystania znacznie mniejszych prądów;
- poprawa wygody użytkownika;
- eliminacja błędów montażu skutkujących przepaleniem ściany kanału;
- mniejsza wrażliwość na błędy wynikające z nieodpowiedniej obsługi.

Celem podstawowym pracy jest zdefiniowanie parametrów elektrycznych i energetycznych nagrzewanych trzpieni przy różnych wymuszeniach prądowo-napięciowych ze zmienną częstotliwością. Przedstawienie charakterystyk nagrzewania i stygnięcia klejonych trzpieni zasilanych z wybranych źródeł elektrycznych umożliwi optymalny dobór źródeł zasilania oraz algorytmów sterujących.

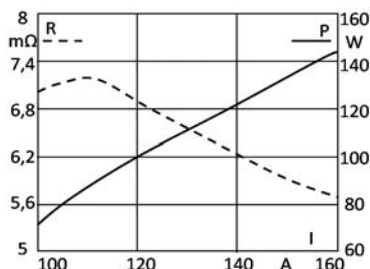
### Parametry energetyczne nagrzewanego trzpienia

Zastępczy schemat trzpienia mocowanego do powierzchni przewodzącej pokazano na rysunku 2. Parametry trzpienia (pomiędzy punktami A i B na rys. 2) określono poprzez jednoczesne wykonywanie badań symulacyjnych i empirycznych przy użyciu źródeł zasilania częstotliwości sieciowej, podwyższonej w zakresie 1 – 10 kHz i średniej 30 – 80 kHz. Nie brano pod uwagę zasilania stałoprądowego, gdyż po przekształceniu energii straty na prostowniku po stronie wtórnej byłyby porównywalne z mocą niezbędną do nagrzania trzpienia.



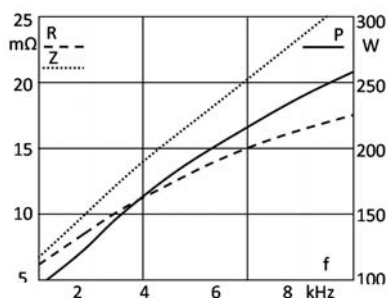
Rys. 2. Schemat zastępczy obwodu elektrycznego badanego trzpienia:  $Z_t$ -impedancja pręta,  $R_s$ -rezystancja styku,  $Z_b$ -impedancja blachy,  $Z_p$ -impedancja przewodów,  $U_z$ -napięcie zasilania

Z uzyskanych rezultatów i obserwacji przebiegów napięcia i prądu wynikało, że trzpień jest obciążeniem praktycznie rezystancyjnym. Wyznaczono zastępczą rezystancję trzpienia  $R = Z_t + R_s$ , przy  $Z_t \equiv R_t$  oraz niezbędną moc do szybkiego, kilkusekundowego nagrzania końca. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.



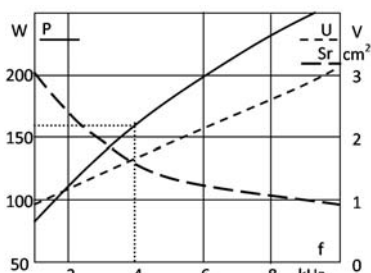
Rys.3. Rezystancja trzpienia i wydzielana moc w zakresie prądów operacyjnych

Dalsze obserwacje nagrzewanego trzpienia w zakresie częstotliwości kilohercowych wykazały, że mniej istotna staje się jego impedancja w części o stałej średnicy a decydującą rolę odgrywa rezystancja styku i jego przewężenia. W tym obszarze powinna koncentrować się moc grzejna pozwalająca na szybkie nagrzanie końcówki trzpienia, na której ma być roztapiany klej. Aby osiągnąć założone parametry temperaturowe w określonym czasie należy przez trzpień przepuścić prąd w zakresie 100 - 120 A. Parametry elektryczne układu grzejnego zostały wyznaczone przy prądzie 120 A i zakresie częstotliwości 1 - 10 kHz. Wybrane parametry, takie jak rezystancja, impedancja i moc zostały zaprezentowane na rysunku 4.



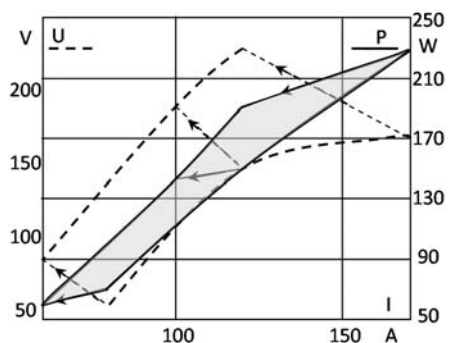
Rys.4. Rezystancja i impedancja trzpienia oraz wydzielana moc przy prądzie 120 A

Wyniki badań empirycznych wskazywałyby na wybór jak najniższej wartości częstotliwości. Jednak energia elektryczna przetwarzana przy niskich częstotliwościach, w tym sieciowej, skutkuje dużymi wymiarami i wagą źródeł zasilania. Szczególnie gabaryty rdzenia transformatora wyjściowego uniemożliwiłyby umieszczenie go w obudowie ręcznego narzędzia. Biorąc pod uwagę tak parametry elektryczne jak i konstrukcyjne (rys. 5) optymalna częstotliwość zasilania jest rzędu 4 kHz.



Rys.5. Moc i napięcie źródła przy prądzie 120 A oraz przekrój rdzenia transformatora

Dla częstotliwości 4 kHz prąd 120 A uzyskuje się przy napięciu około 1,7 V. Odpowiadająca powyższym wartościom moc grzejna 160 W wymaga użycia rdzenia o przekroju powyżej 2 cm<sup>2</sup>. Uzyskane parametry są kompromisem pomiędzy sprawnością nagrzewania trzpienia a konstrukcją źródła zasilania. Do ustalenia rozwiązania układowego źródła zasilania wraz z układami kontrolno-pomiarowymi należy wziąć pod uwagę zmienność parametrów energetycznych i elektrycznych podczas nagrzewania. Przykładowe zmiany rosnącego napięcia wyjściowego, pokazane na rysunku 6 linią przerywaną powodują zmniejszanie prądu kompensując zmiany mocy. W interesującym zakresie prądowym moc wydzielana prawie nie ulega zmianie. Znacznie większy wpływ będą miały wahania napięcia sieci zasilającej na energetyczne właściwości procesu grzania.

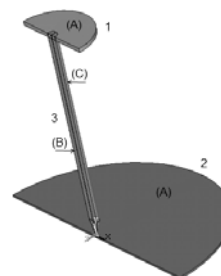


Rys.7. Zmiana mocy i napięcia źródła w funkcji prądu podczas nagrzewania trzpienia

### Modelowanie procesu nagrzewania

Obliczenia oraz wyniki pomiarów prezentowane w poprzednich rozdziałach niniejszej pracy zostały porównane z wynikami symulacji numerycznych wykonanych dla analogicznych warunków procesowych. Konieczność wykonania modeli oraz wielowariantowych obliczeń numerycznych wynika z chęci analizy zróżnicowanych warunków konstrukcji, co umożliwić powinno racjonalizację konstrukcji pod kątem układów zasilających oraz układów sterowania.

Z uwagi na znaczną komplikację modeli wynikającą z konieczności uwzględniania zarówno przestrzenny rozkład prądów, źródeł ciepła i temperatur, jak i czasowych charakterystyk nagrzewania, modele wykonano przy wykorzystaniu dostępnego, profesjonalnego oprogramowania typu MES. Geometria wykonanych modeli była zgodna z pokazaną na rysunku 8.



Rys. 8. Geometria modelu. (A) – blacha stalowa; (B)- trzpień stalowy; (C) – miedziane pokrycie trzpienia

Modelowanie procesu nagrzewania wymagało rozwiązania równania przewodzenia ciepła w postaci charakterystycznej dla ciał stałych (1).

$$(1) \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \frac{\lambda}{\rho c_p} (\nabla^2 t) + \frac{P_V}{c\rho}$$

gdzie:  $t$  - temperatura,  $\tau$  - czas,  $\lambda$  - przewodność cieplna właściwa,  $c_p$  - ciepło właściwe,  $\rho$  - masa właściwa,  $p_V$  - objętościowa wydajność źródeł ciepła

Podczas symulacji procesu nagrzewania, zastosowano warunki brzegowe trzeciego rodzaju (2), umożliwiające wyznaczenie strumieni ciepłych wymienianych na drodze konwekcji i radiacji pomiędzy powierzchniami ciał stałych oraz otoczeniem. Przyjęto występowanie wymienionych warunków brzegowych na powierzchni bocznej trzpienia (C na rys. 6), powierzchniach końcówki montażowej oraz blachy kanału (A na rys. 6).

$$(2) \quad -\lambda \left( \frac{dt}{dw_p} \right)_p = \alpha (t_p - t_0)$$

gdzie:  $w_p$  - współrzędna przestrzenna,  $t_p$  - temperatura powierzchni ciała,  $t_0$  - temperatura otoczenia,  $\alpha$  - współczynnik przyjmowania ciepła.

Rozwiązanie równania (1) wymagało wyznaczenia rozkładu źródeł ciepła w nagrzewanym materiale ( $p_V$ ). Wartość ta zależy od wymiarów, parametrów materiałowych oraz wartości częstotliwości i prądu w analizowanym układzie. Wszystkie powyższe parametry uwzględniane były w podstawowych równaniach elektrodynamiki, stanowiących podstawę wyznaczania poszukiwanego rozkładu mocy. W przypadku analizowanego przewodnika o geometrii cylindrycznej, wyznaczenie mocy objętościowej źródeł ciepła może zostać zrealizowane przy wykorzystaniu zależności (3) i (4).

$$(3) \quad \frac{d^2 J}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dJ}{dr} + \frac{1+j}{\sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}} J = 0$$

$$(4) \quad p_V = \frac{J^2}{2\gamma l^2}$$

gdzie:  $J$  - gęstość prądu,  $r$  - promień,  $l$  - długość,  $\mu$  - przenikalność magnetyczna,  $\gamma$  - konduktywność,  $\omega$  - pulsacja.

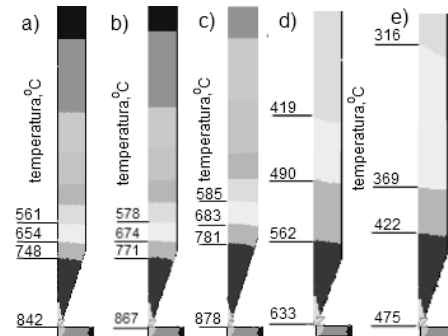
Równania typu (2) – (5) stanowią układ równań konieczny do rozwiązania podczas symulacji problematyki prezentowanej w niniejszej pracy. Parametry materiałowe wykorzystane do analiz zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry materiałowe

Element	Materiał	Parametr	Wartość	Uwagi
trzebień	stal	rezystywność	10e-8 $\Omega$ m	ferromagnetyk o stałej przenikalności, rezystywność tablicowana w funkcji temperatury
trzebień	stal	przewodność cieplna właściwa	53 W/mK	tablicowana w funkcji temperatury
podłoże	stal	rezystywność	10e-8 $\Omega$ m	wartość stała
podłoże	stal	przewodność cieplna właściwa	53 W/mK	wartość stała

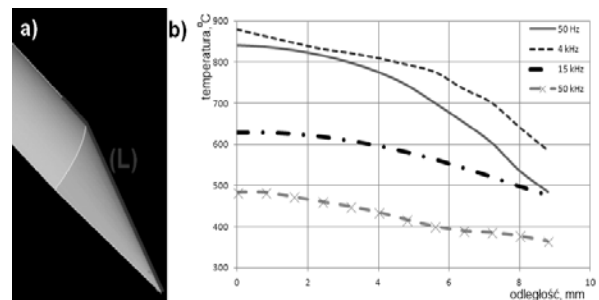
Wartość prądu płynącego w obwodzie utrzymywana była na poziomie 120 A, co odpowiadało warunkom wymuszenia prądowego. Niestacjonarne pole temperatury wyznaczano dla czasu 0 – 5 s, z krokiem 0,1 s. Obliczenia wykonano dla zróżnicowanych częstotliwości prądu w

granicach 50 Hz – 50 kHz. Celem analiz było wyznaczenie rozkładów temperatury w okolicy końcówki trzpienia przylegającego do stalowej powierzchni kanału. Lokalizacja ta jest najistotniejsza z punktu widzenia realizacji procesu zgrzewania. Na podstawie wykonanych analiz możliwe było wyznaczenie optymalnego zakresu częstotliwości, w którym powinno funkcjonować urządzenie przeznaczone do realizacji technologii zgrzewania zgodnie z zakładanym procesem. Pola temperatury w przekroju trzpienia, w okolicy jego końcówki pokazano na rysunku 9. Są to pola uzyskane po trzech sekundach nagrzewania. Czas ten przyjęto jako maksymalny czas nagrzewania.



Rys. 9. Pola temperatury w okolicy końcówki trzpienia po 3 sekundach nagrzewania. a)  $f=50$  Hz; b)  $f=500$  Hz; c)  $f=4$  kHz; d)  $f=15$  kHz; e)  $f=50$  kHz

Z zaprezentowanych rezultatów widać, iż wzrost częstotliwości skutkuje zwiększeniem jednorodności pola temperatury w okolicy końców trzpienia, przylegającej do blachy. Efekt ten jest lepiej widoczny na rysunku 10.

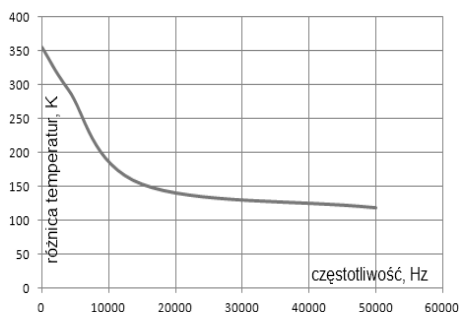


Rys. 10. Rozkłady pola temperatury na powierzchni zewnętrznej trzpienia (b), zgodnie z oznaczeniami (a)

Wzrost częstotliwości roboczej, pomimo wzrostu mocy wydzielanej w trzpieniu w postaci ciepła, powodował zmniejszenie maksymalnej temperatury występującej w miejscu styku trzpienia z podłożem. Efekt ten wynika z bardziej jednorodnego nagrzewania całej powierzchni trzpienia, nie tylko w okolicy ostrza (połączenia trzpienia z podłożem). Efekt ten jest widoczny w postaci bardziej jednorodnych rozkładów temperatury w okolicach ostrza, co pokazano na rysunku 11.

Na podstawie wykonanych wyników stwierdza się:

- wykorzystanie trzpieni stalowych pokrytych warstwą miedzi do procesu zgrzewania jest pożądane z uwagi na możliwość wytworzenia odpowiednich rozkładów temperatury;
- wytworzenie maksymalnych różnic temperatur pomiędzy ostrzem trzpienia oraz powierzchnią od ostrza oddaloną możliwe jest przy niskich częstotliwościach roboczych, nie przekraczających 5 kHz;
- stosowanie wyższych częstotliwości prowadzi do bardziej jednorodnego nagrzewania powierzchni trzpienia, co negatywnie wpływa na możliwość realizacji procesu klejenia.

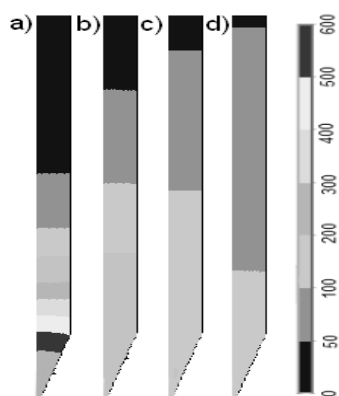


Rys. 11. Zależność różnicy temperatur na powierzchni ostrza trzpienia od częstotliwości

### Modelowanie procesu studzenia

Celem obliczeń procesu chłodzenia trzpienia było określenie czasu wymaganego do uzyskania stabilnego połączenia trzpienia z podłożem. Połączenie to wymaga przejścia warstwy kleju do stanu stałego, określonego wartościami temperatur w strefie klejenia. Zastosowano warunki brzegowe III rodzaju na powierzchni bocznej trzpienia oraz powierzchni blachy. Warunki odpowiadały przejmowaniu ciepła przez konwekcję i radiację, z uwzględnieniem występowania warstwy materiału termoizolacyjnego pokrywającego wymienione elementy. W okolicy styku trzpienia z podłożem (warstwa pokryta klejem) zastosowano warunek zerowego strumienia cieplnego. Jako warunek początkowy przyjęto rozkład temperatury uzyskany na podstawie obliczeń pokazanych na rysunku 9. Stwierdzono, iż zastosowane warunki odpowiadały najgorszym warunkom pracy urządzenia.

Na rysunku 12 pokazano pola temperatury w strefie klejenia w odmiennych fazach procesu studzenia.

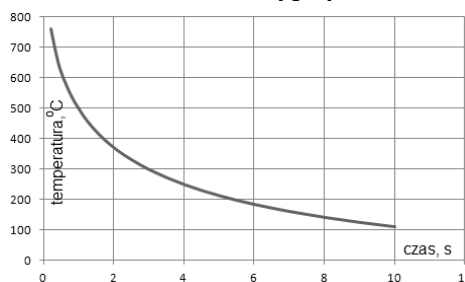


Rys. 12. Pola temperatury w okolicy ostrza trzpienia, w różnych chwilach. a - 0s, b - 3s, c - 6s, d - 9s.

Na podstawie rysunku 12 stwierdza się, że temperatury niższe od temperatury przejścia kleju do fazy stałej (poniżej 180°C) występują po czasie 6-7 sekund. Przebieg temperatury ostrza trzpienia w funkcji czasu pokazano na rysunku 13.

Wykonane obliczenia umożliwiły określenie czasu wymaganego stygnięcia, gwarantującego poprawne przyklejenie elementu montażowego. Czas ten jest około dwukrotnie dłuższy od czasu nagrzewania. Dokładne obliczenie czasu stygnięcia zależy od parametrów wykorzystanego kleju oraz parametrów izolacji cieplnej kanału i podłoża. Oszacowanie dwóch ostatnich parametrów nie jest problematyczne i zostało wykonane w

trakcie tworzenia modelu numerycznego. Tym niemniej, dysponowanie parametrami materiałowymi oraz wymiarami wykorzystywanej warstwy kleju jest konieczne do wykonania obliczeń uzupełniających, umożliwiających dokładne oszacowanie czasów stygnięcia.



Rys. 13. Charakterystyka studzenia trzpienia

Prezentowane wyniki dotyczą najbardziej niekorzystnych warunków, w których warstwa kleju stanowi idealną izolację cieplną. Należy spodziewać się, iż rzeczywiste czasy stygnięcia będą nieco krótsze.

Wyniki zaprezentowane w niniejszym rozdziale stanowią istotny parametr, umożliwiający określenie warunków eksploatacji urządzeń przeznaczonych do realizacji procesu klejenia. Wyniki wykorzystano do opracowania algorytmu systemu sterowania i nadzoru, opisanego w rozdziale 8 pracy.

### Podsumowanie

Zagadnienia zaprezentowane w niniejszej pracy dotyczą koncepcji oraz konstrukcji nowego typu urządzenia do montażu izolacji cieplnej kanałów wentylacyjnych poprzez przyklejanie specjalnych trzpieni montażowych. Głównym celem pracy było wykonanie i opis badań umożliwiających określenie warunków konstrukcji urządzenia tej klasy. W ramach pracy wykonano następujące prace:

- badania symulacyjne przy wykorzystaniu modeli numerycznych;
- modele fizyczne urządzeń grzewczych wykorzystujące zróżnicowane częstotliwości;
- badania fizycznych modeli urządzeń;
- analiza czynników wpływających na proces nagrzewania;
- dobór optymalnych źródeł zasilania urządzenia;
- konstrukcja układu pomiarowo – kontrolnego.

Uzyskano dobrą zgodność pomiędzy wynikami symulacji oraz badań fizycznych. Fakt ten świadczy o poprawności wykonanych prac oraz dokładności wyznaczonych charakterystyk.

**Autorzy:** dr inż. Ryszard Niedbala, Politechnika Warszawska Instytut Elektroenergetyki, ul Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: Ryszard.niedbala@ee.pw.edu.pl;

### LITERATURA

- [1] Väkeväinen K., The effect of material properties to electric field distribution in medium voltage underground cable accessories, *Degree Thesis*, 2010
- [2] Kuusisto O., The Effects of Installation-Based Defects in Medium Voltage Cable Joints, *Bachelor Thesis*, March 15, 2016
- [3] Siti Nur Ai Binti Mahd Rawe, Investigation on non-linear