**Odcinek**

**Tytuł: “ITER – budujemy Słońce na Ziemi”**

Prowadzący: redaktor Rafał Molenda.

Gość: Profesor Monika Lewandowska z Katedry Technologii Energetycznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

***Rafał Molenda:*** *To jest podcast Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego.*

*Dziś będziemy rozmawiać o Słońcu. Nie o tym, które świeci nam za oknami, nie tym wokół którego poruszamy się wraz z naszą matką Ziemią, ale tym, które tworzone jest przez człowieka.*

*Dzień dobry, nazywam się Rafał Molenda, spotykamy się w kolejnym odcinku naszego podcastu. Tym razem będziemy rozmawiali o słońcu, które budują ludzie. Wiem, że to brzmi jak prowokacja, ale to już się dzieje. W tym projekcie budowy “słońca” na Ziemi, biorą udział naukowcy z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, a wśród nich jest Pani profesor Monika Lewandowska z Katedry Technologii Energetycznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT. Dzień dobry Pani Profesor.*

**Monika Lewandowska**: Dzień dobry.

***Rafał Molenda:*** *Nie boi się Pani tego słońca?*

**Monika Lewandowska**: Nie wiem, czy doczekam, kiedy to słońce zacznie świecić i zacznie nas karmić energią elektryczną, ale chciałabym jednak doczekać.

***Rafał Molenda:***  *Prace trwają ale czy to odległa przyszłość?*

**Monika Lewandowska**: Reaktory fuzji jądrowej są budowane, są to jednak urządzenia eksperymentalne, mające na celu udzielić nam konkretnych odpowiedzi na pytania czy to dotyczące fizyki plazmy, czy różnych rozwiązań technologicznych mających zastosowanie do pozyskania energii. Reaktory, o których mówię nie są jeszcze w żaden sposób sprzężone z elektrownią. Mimo tego trwają już prace nad projektem elektrowni, w których te reaktory znajdą swoje zastosowanie, wraz z urządzeniami, które będą miały za zadanie zamianę energii cieplnej, wytworzonej w reaktorze na energię elektryczną.

***Rafał Molenda:*** *Mówimy o laboratorium, w którym będziemy mogli testować rozwiązania na przyszłość. To laboratorium ma swoją nazwę, bo to się nazywa TOKAMAK według Encyklopedii PWN magnetyczna pułapka służąca do wytwarzania gorącej plazmy, czyli tego, co mamy na Słońcu.*

**Monika Lewandowska**: Tak. W temperaturach powyżej 1000 stopni materia nie istnieje w takim stanie, jaki znamy  z życia codziennego, w tak wysokich temperaturach elektrony odrywają się od swoich jąder i poruszają się już zupełnie niezależnie od siebie. Taki stan materii nazywamy – gorącą plazmą.

***Rafał Molenda:*** *Pani mówi to z uśmiechem. Rozmawiałem z osobami, które nie znają się na tym, ale które mają swoją opinię na temat elektrowni jądrowych. Posłuchajmy co mają do powiedzenia.*

**GŁOS**: Obawiam się. Jestem starszą kobietą i pamiętam wypadek w Czarnobylu, minęło już mnóstwo lat., Nie wiem, czy to jest do końca poznana technologia i czy jest bezpieczna.

**GŁOS:** Uważam, że w Polsce już dawno powinno być zbudowanych kilka elektrowni jądrowych.

**GŁOS:** Nie jestem ekspertem, nie mam pewności czy to jest bezpieczne.

**GŁOS:** Uważam, że to bezpieczne, skoro kraje rozwinięte posiadają wiele elektrowni jądrowych. I korzystają z tak wyprodukowanego prądu elektrycznego.

**GŁOS:** Nie znamy tego, na co dzień się tego nie spotyka.

**GŁOS:** Za granicą jest tego bardzo dużo, to nie ma znaczenia, czy mamy to my, czy mają to Niemcy.

**GŁOS:** To jest odległa przyszłość i chyba do tej pory nie zbadana.

**GŁOS:** Jakie znaczenie ma fakt gdzie dojdzie do awarii, czy we Francji, Niemczech, czy w Polsce? To będzie dokładnie takie same zagrożenie.

***Rafał Molenda:*** *Jak Pani to skomentuje?*

**Monika Lewandowska**: Zasada działania elektrowni fuzji jądrowej jest odmienna od elektrowni jądrowych,  w których dochodzi do reakcji rozszczepienia jąder ciężkich pierwiastków i to samorzutnie. Wystarczy, że dojdzie do zgromadzenia wystarczająco dużej ilości materiału rozszczepialnego i następuje samorzutna reakcja łańcuchowa. Reakcja łańcuchowa w tradycyjnej elektrowni jądrowej jest w pełni kontrolowana poprzez wsuwanie lub wysuwanie prętów z materiałem rozszczepialnym. W przypadku wysunięcia części prętów z reaktora reakcja spowalnia i reaktor się schładza, a kiedy są wsuwane - analogicznie reakcja przyspiesza. Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie wtedy, gdy jest zgromadzone dostatecznie dużo materiału rozszczepialnego w jednym miejscu, czyli kiedy zostanie przekroczona masa krytyczna.

W przypadku fuzji jądrowej mówimy zupełnie o czymś innym. Energia nie jest uzyskiwana, przez rozszczepienie ciężkiego jądra na mniejsze fragmenty, a przez połączenie lekkich jąder, tworzymy jądro cięższe, czyli proces zupełnie odwrotny. Reakcje jądrowe pozwalają na uzyskanie energii gdy masa produktów powstałych w wyniku reakcji jest mniejsza niż masa substratów – tych jąder, które wchodzą w reakcje.

***Rafał Molenda:*** *Innymi słowy energia to kawałek wykrojony z tej masy.*

**Monika Lewandowska**: Tak. Masa zamienia się w energię zgodnie ze wzorem Einsteina. Energia to E=mc2.

***Rafał Molenda:*** *Einstein już to kiedyś wymyślił.*

**Monika Lewandowska**: Jeżeli zatem produkty reakcji mają masę mniejszą niż substraty (tzn. masa przed reakcją jest większa niż po jej zakończeniu), to ta różnica masy może być zmieniona w energię.

***Rafał Molenda:*** *Zatrzymam się na chwilę. Pułapka magnetyczna – rosyjski pomysł stworzony w latach pięćdziesiątych w Moskwie, trzyma plazmę w cylindrze ?*

**Monika Lewandowska**: Chcemy aby lekkie jądra deuteru i trytu (izotopów wodoru 2H i 3H) połączyły się tworząc w wyniku reakcji jądro helu (4He) oraz neutron. W skład jądra 4He wchodzą 2 protony i 2 neutrony, jednakma ono masę zdecydowanie mniejszą od masy dwóch swobodnych protonów i dwóch neutronów. Jeśli zatem ono będzie produktem naszej reakcji to jest szansa na uzyskanie bardzo dużej ilości energii. Problem polega na tym, że lekkie jądra o ładunku dodatnim nie chcą się do siebie zbliżać, odpychają się siłami Coulomba i „nie chcą” wchodzić ze sobą w reakcje. Musimy zatem rozpędzić je do dostatecznie dużej prędkości,  by były w stanie pokonać to odpychanie elektrostatyczne i miały szansę zbliżyć się na tak małą odległość, w której zaczynają działać silne oddziaływania jądrowe. Siły jądrowe przyciągające  są silniejsze od odpychania elektrostatycznego, ale o ile oddziaływanie Coulombowskie, podobnie jak grawitacyjne jest oddziaływaniem dalekiego zasięgu – jego siła maleje z kwadratem odległości, o tyle oddziaływanie silne jądrowe jest zdecydowanie silniejsze, ale działa tylko na bardzo małej odległości, rozmiarów rzędu jądra atomowego.

***Rafał Molenda:*** *Jak rozpędzić lekkie jądra?*

**Monika Lewandowska**: Miarą prędkości cząsteczek jest temperatura, musimy je zatem ogrzać. Dlatego mówimy o gorącej plazmie. Reakcje termojądrowe zachodzą we wnętrzach gwiazd, gdzie warunki są dość ekstremalne: temperatura rzędu milionów stopni, duża gęstość materii, co sprzyja temu, że częstość zderzeń jest odpowiednio większa. W warunkach ziemskich nie jesteśmy w stanie wytworzyć aż tak dużych gęstości materii jak ta panująca we wnętrzach gwiazd, musimy zatem uzyskać jeszcze wyższą temperaturę, mniej więcej dziesięciokrotnie wyższą od tej jaka panuje we wnętrzach gwiazd. Dopiero wtedy reakcja ma szansę zajść.

O co chodzi z pułapką magnetyczną? Już odpowiadam. W polu magnetycznym naładowane cząstki poruszają się po spiralnych torach wzdłuż linii sił pola magnetycznego. Jeżeli wytworzymy takie pole magnetyczne aby konfiguracja jego linii sił przypominała nieco obwarzanek to cząstki będą poruszać się wzdłuż tych linii, nie wychodząc poza obszar „obwarzanka”.

***Rafał Molenda:*** *Mamy już to pole magnetyczne, ale ono musi być jakoś wytwarzane i zasilane.*

**Monika Lewandowska**: Źródłem pola magnetycznego mogą być poruszające się ładunki elektryczne, np. prąd przepływający przez przewodnik. Wokół każdego przewodnika z prądem wytwarza się pole magnetyczne. Elektromagnesy tworzy się przez budowanie cewek magnetycznych. Cewka to zamknięty obwód składający się z wielkiej liczby zwojów, ponieważ indukcja pola magnetycznego, które jest wytwarzane w otoczeniu cewki zależy od natężenia prądu i od liczby zwojów. Innymi słowy, im więcej zwojów nawiniemy i im większym prądem zasilimy cewkę, tym silniejsze pole magnetyczne uzyskamy. W celu stworzenia pułapki magnetycznej w reaktorze fuzji jądrowej wytwarzane są bardzo wysokie pola magnetyczne o indukcji rzędu kilku - kilkunastu tesli. Wobec tego prądy robocze, które przepływają w uzwojeniach magnesów stosowanych w technologii fuzji jądrowej są na poziomie kilkudziesięciu  tysięcy amperów. To zdecydowanie wyższe prądy niż te, z którymi mamy do czynienia na co dzień. Przepływowi prądu towarzyszy wydzielanie się ciepła Joule’a. Generowana moc ciepła Joule’a  zależy od natężenia prądu roboczego - jest tym większa, im większy prąd przepływa przez urządzenie oraz od oporu elektrycznego urządzenia - im opór jest większy, tym większa ilość mocy cieplnej. Budując cewki elektromagnesu, przez które będą płynąć ogromne natężenia prądu, musimy użyć materiałów o jak najmniejszym oporze, a najbardziej obiecujące pod tym względem są nadprzewodniki. Nadprzewodniki to takie materiały, które w stanie nadprzewodzącym mają zerowy opór elektryczny, wówczas ciepło Joule’a związane z przepływem prądu stałego w ogóle nie jest wydzielane.

***Rafał Molenda:*** *Co jest takim nadprzewodnikiem?*

**Monika Lewandowska**: Niektóre metale, stopy i związki międzymetaliczne schładzane do temperatur kriogenicznych rzędu -260 oC - -270oC. Są to tzw. nadprzewodniki niskotemperaturowe, których technologia jest już stosunkowo dobrze opanowana. Obecnie najczęściej w zastosowaniach praktycznych używane są materiały niskotemperaturowe: stop niob - tytan (Nb-Ti) i związek międzymetaliczny Nb3Sn. Są to materiały dość powszechnie wykorzystywane m.in. w magnesach stosowanych w nowoczesnych aparatach rezonansu magnetycznego w medycynie. Te nadprzewodniki są również wykorzystywane w elektromagnesach ostatnio zbudowanych oraz obecnie powstających reaktorów fuzji jądrowej.

***Rafał Molenda:*** *Wracając do tego międzynarodowego projektu badawczego mającego na celu zbudowanie reaktora termonuklearnego ITER, to pierwsze testy w tym laboratorium planowane są na 2025 rok.*

**Monika Lewandowska**: Nazwa ITER to akronim będący skrótem pełnej nazwy angielskiej: **I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor, co oznacza Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy. Budowa reaktora ITER już dość zaawansowana. Na początku 2017 r. byłam na terenie budowy reaktora ITER, przy okazji spotkania międzynarodowego zespołu uczestniczącego w projekcie. Obwieziono nas autokarem po terenie budowy, ale prace wówczas nie były na poziomie zaawansowanym.

***Rafał Molenda:*** *Czy możemy powiedzieć, gdzie dokładnie powstaje to centrum?*

**Monika Lewandowska**: W centrum badawczym Cadarache na południu Francji. Uzyskanie pierwszego zapłonu plazmy początkowo zaplanowane było na 2019 r., następnie termin ten przesunięto na 2025 r. i jeszcze przed dwoma laty termin ten wydawał się jak najbardziej realny, ale obecnie może się to wszystko jeszcze bardziej przesunąć w czasie, przede wszystkim ze względu na pandemię.

***Rafał Molenda:*** *Przypomnijmy, że to projekt międzynarodowy. Co Pani robi w tym projekcie?*

**Monika Lewandowska**: Zajmuję się zagadnieniami chłodzenia magnesów nadprzewodnikowych. Ponieważ podczas pracy muszą one znajdować się w stanie nadprzewodzącym, a ich typowa temperatura robocza jest na poziomie 4-6 K (ok. -268oC), zatem zapewnienie odpowiednich warunków chłodzenia jest kluczowe dla ich prawidłowego działania. Wraz z zespołem prowadzimy symulacje ich pracy, czyli modelujemy wymianę ciepła pomiędzy przewodami a przepływającym chłodziwem (nadkrytycznym helem) uwzględniając przewidywane warunki pracy kabla: wartość prądu roboczego, rozkład pola magnetycznego oraz obciążenia cieplne, wynikające np. z pochłaniania neutronów wydostających się z reaktora. Chodzi o sprawdzenie czy przy spodziewanych obciążeniach cieplnych nie dojdzie do przekroczenia tzw. temperatury krytycznej i przejścia tego kabla ze stanu nadprzewodzącego w stan normalny, a zatem czy kabel skonstruowany zgodnie z analizowanym projektem ma szansę pracować bezpiecznie.

***Rafał Molenda:***  *To zatem kwestia bezpieczeństwa, bardzo duża odpowiedzialność.*

**Monika Lewandowska**: W zasadzie nasza praca nie jest dla ITER-u, ponieważ magnesy dla tego reaktora są już obecnie produkowane, dostarczane na plac budowy i tam montowane, zatem nie wymagają prowadzenia dodatkowych analiz. Obecnie pracujemy dla projektu EU DEMO, (jest to skrót od EUropean DEMOnstration Fusion Power Plant), będzie to kolejny reaktor, który ma już być sprzężony z elektrownią.

***Rafał Molenda:*** *Z siecią energetyczną i ma dostarczać prąd.*

**Monika Lewandowska**: Tak. Magnesy reaktora DEMO są obecnie na etapie wstępnych prac projektowych. Poszczególne zespoły dostarczają mi projekty kabli, z których będą nawijane cewki a nasz zespół prowadzi obliczenia cieplno-przepływowe i sprawdza, czy taki kabel będzie miał szansę pracować pozostając w stanie nadprzewodzącym,  a gdyby jednak przeszedł w stan normalny, to czy nie spowoduje to zniszczenia urządzenia.

***Rafał Molenda:*** *Istnieje zatem takie ryzyko?*

**Monika Lewandowska**: Magnesy nadprzewodnikowe są powszechnie używane m.in. w akceleratorach, np. Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) w CERN posiada w swoim wnętrzu kilka tysięcy takich magnesów. Każdy kto z tym pracuje wie, że czasami zdarza się utrata stanu nadprzewodzenia, czyli tzw. *quench*, chodzi jednak o to, aby takie zdarzenie nie doprowadziło do zniszczenia magnesu.

***Rafał Molenda:***  *To dość niepokojące, są jakieś systemy zabezpieczeń?*

**Monika Lewandowska**: Oczywiście. Symulujemy takie wypadki. W momencie kiedy cewka jest w stanie nadprzewodzącym, a więc nie ma oporu, to przepływowi prądu nie towarzyszy spadek napięcia. Każdy magnes nadprzewodnikowy jest wyposażony w czujniki, w tym czujniki napięcia. W momencie, w którym jakikolwiek odcinek kabla, który tworzy cewkę, przejdzie w stan normalny, w tym miejscu pojawia się opór elektryczny i spadek napięcia. W tym momencie czujniki to wykażą i jeśli zostanie przekroczone pewne progowe napięcie rozpoczyna się procedura wyłączenia prądu.

***Rafał Molenda:***  *Jak duże jest to „słońce”?*

**Monika Lewandowska**: Są takie, do których pracownicy obsługi z trudem mogliby się wcisnąć.  Ale np. ITER- do niego spokojnie można wejść i wykonać jakieś prace konstrukcyjne, ale oczywiści jeszcze przed uruchomieniem reaktora. Po uruchomieniu w ścianach reaktora mogą pojawiać się różne izotopy radioaktywne, a to z kolei będzie wymagać obsługi zdalnej przez roboty. W obsłudze reaktora dużą uwagę przykłada się np. do możliwości wymiany zdalnej zużytych modułów. W projekcie biorą udział między innymi robotycy i automatycy oraz inżynierowie wielu innych specjalności.

***Rafał Molenda:*** *To gigantyczne przedsięwzięcie, jeżeli Pani zespół zajmuje się nadprzewodzącymi magnesami, to można sobie wyobrazić, że każdym elementem zajmuje się sztab ludzi z całego świata.*

**Monika Lewandowska**: W 2025 roku, może w 2026, spodziewamy się, że w ITER pojawi się pierwsza plazma. Problem polega na tym, że samo zainicjowanie zapłonu plazmy w reaktorze wymaga dostarczenia bardzo dużej ilości energii. A nas interesuje, żeby udało się uzyskać znacznie więcej energii niż się włożyło – określa to tzw. współczynnik wzmocnienia jest to stosunek mocy uzyskanej z reakcji fuzji jądrowej do mocy zużytej w celu zainicjowania reakcji fuzji. Jednym z celów projektu ITER jest osiągniecie współczynnika wzmocnienia na poziomie 10. Pamiętajmy, że to będzie to reaktor eksperymentalny, a nie urządzenie komercyjne, powstała energia nie zostanie zamieniona na energię użyteczną. Dopiero projekt DEMO umożliwi wykorzystywanie tej technologii do produkcji prądu elektrycznego, ale szacujemy, że nastąpi to w połowie stulecia.

Konkurencyjne są projekty DEMO chiński i koreański ale również one są dopiero we wczesnym stadium projektowym. Pamiętajmy, że mamy problem również ze sposobem odbierania tej energii z reaktora. Innym problemem jest  tryt – nietrwały izotop wodoru, występujący w przyrodzie w ilościach wręcz śladowych, który będzie jednym z substratów reakcji fuzji. W reaktorze fuzji jądrowej będzie zachodzić reakcja deuter + tryt. O ile deuter jest izotopem trwałym, który można pozyskiwać po prostu z wody, to tryt musi być wytwarzany we wnętrzu samego reaktora. Jednym z celów projektu ITER będzie testowanie różnych metod produkcji trytu na miejscu, we wnętrzu reaktora. Reaktor ma sam dla siebie produkować paliwo!

Do tego oczywiście należy zbudować całą elektrownię która będzie zamieniać energię cieplną pochodzącą z reaktora na energię elektryczną. I tu pojawia się kolejny problem – w DEMO zapłon plazmy ma trwać ok. 2 godzin, po których będzie następować ok. 10-minutowa przerwa. Generalnie elektrownie nie pracują tak, żeby dostarczać im dużą moc cieplną z kilkunastoma przerwami w ciągu każdej doby, a w tym wypadku plany elektrowni muszą właśnie zakładać to, że elektrownia będzie zaopatrywana w energię cieplną w sposób impulsowy. To kolejny problem technologiczny, z którym należy sobie poradzić. Nasz zespół pracuje też nad projektami siłowni dla reaktora DEMO.

***Rafał Molenda:*** *Nikt nie powiedział, że budowa „słońca” jest prosta. Nikt też nie powiedział, że jesteśmy w stanie takie „słońce” zbudować tak po prostu. To energia „zielona” o wiele „zdrowsza” niż ta pozyskiwana z elektrowni jądrowych, dlatego, że wszelkiego rodzaju odpadów radioaktywnych jest dużo mniej.*

**Monika Lewandowska**: Jedynym śmieciem będzie ten reaktor, oczywiście na końcu jego życia. Produktem samej reakcji termojądrowej deuter + tryt jest hel (4He), który nie jest radioaktywny.

Warto też podkreślić, że tu nie ma możliwości wybuchu samego reaktora, ponieważ w jego komorze jest zaledwie ok. jednego grama paliwa, co więcej reakcja samorzutne nie chce zachodzić, trzeba się mocno namęczyć, żeby ją zainicjować.

***Rafał Molenda:*** *Nie powstanie zatem żadna chmura radioaktywna?*

**Monika Lewandowska**: Nie, ponieważ ewentualna awaria nie powinna być związana z samymi reakcjami jądrowymi. Mogłabym sobie wyobrazić np. awarię magnesów na skutek niekontrolowanego quench’u (utraty stanu nadprzewodzenia), który spowodowałby duży wzrost ciśnienia w instalacji kriogenicznej, w 2008 r. odnotowano taki przypadek w CERN-ie, ale z tej lekcji wyciągnięto wnioski i obecnie potrafimy lepiej zabezpieczać się przed tego rodzaju wypadkami.

***Rafał Molenda:***  Czekamy zatem na dzień otwarcia „słońca” , będzie Pani na miejscu?

**Monika Lewandowska**: Tego nie wiem, na pewno będzie to duże wydarzenie.

***Rafał Molenda:***  *Czego można życzyć?*

**Monika Lewandowska**: Młodych, zdolnych i chętnych współpracowników.

***Rafał Molenda:***  *Bardzo dziękuje za to spotkanie.*

**Monika Lewandowska**: Dziękuję.

***Rafał Molenda:*** *Do usłyszenia w kolejnym odcinku.*

*To jest podcast Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologiczneg*o.