



UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE FIZICĂ
ȘCOALA DOCTORALĂ DE FIZICĂ



ESMAEIL JALALI LAVASANI

**EN: THERMOELECTRIC GENERATOR WITH RADIOISOTOPES. SPACE
APPLICATIONS**

**RO: GENERATOR TERMOELECTRIC CU RADIOIZOTOPI. APLICAȚII
SPAȚIALE**

REZUMAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC/SUPERVISOR

PROF. DR. IOAN STAMATIN

BUCHAREST 2024

Cuprins

1	INTRODUCERE	3
2	TERMoeLECTRICITATE: ASPECTE TEORETICE ȘI APLICAȚII	3
	2.1 Efectele termoelectrice: conversia directă a energiei.	3
	2.1.1 Efectul Seebeck	3
	2.1.2 Efectul Peltier	4
	2.1.3 Efectul Thomson	4
	2.1.4 Efecte în câmpul magnetic	4
	2.1.5 Efectul transportului	4
	2.1.6 Figura de merit	4
	2.2 Referințe	5
3	GENERATOARE CU RADIOIZOTOPI ÎN MISIUNILE SPAȚIALE	6
	3.1 GENERATOARE TERMoeLECTRICE CU RADIOIZOTOPI	6
	3.2 MISIUNI SPAȚIALE – STUDIU ACTUAL	8
	3.2.1 Programul ESA	10
	3.2.2 RTG de tip rusesc și alte aplicații	10
	3.3 UNITĂȚI DE ÎNCĂLZIRE CU RADIOIZOTOPI (RHUs)	10
	3.4 CONCLUZII	11
4	GENERATOARE TERMoeLECTRICE	12
	4.1 GENERATOARE TERMoeLECTRICE CU COMBUSTIBILI FOSILI (TGFF)	12
	4.2 BATERIA BETAVOLTAICĂ	13
	4.2.1 Baterie Nuclează Rezonantă	13
	4.2.2 Prezentare Generală a Celulelor Betavoltaice	14
	4.3 MISIUNI AMERICANE FOLOSIND SISTEME DE PUTERE CU RADIOIZOTOPI	14
	4.4 CONCLUZII	15
	4.5 REFERINȚE	15
5	STUDIUL EXPERIMENTAL	17
	5.1 OXIDUL DE COBALT SODIU (Na_xCoO_2)	17
	5.1.1 PREZENTARE GENERALĂ A OXIZILOR DE COBALT CA MATERIALE TERMoeLECTRICE	17
	5.1.2 Proprietăți ale oxidului de cobalt sodiu (Na_xCoO_2)	17
	5.1.3 Aplicații ale Na_xCoO_2	17

5.1.4	REZULTATE ȘI DISCUȚII	18
5.1.5	CONCLUZII	22
5.2	SINTEZE PE BAZĂ DE BACOCA. PROPRIETĂȚI TERMoeLECTRICE ȘI CARACTERIZĂRI	22
5.2.1	Introducere	22
5.2.2	Materiale și procedura de sinteză	22
5.2.3	Rezultate și discuții	23
5.2.4	CONCLUZII	25
6	TRANSFER DE CĂLDURĂ ÎN RTG - MODELARE ȘI SIMULARE	26
6.1	MATERIALE PENTRU TERMALIZARE ȘI PROTECȚIE ÎMPOTRIVA RADIATIILOR X, GAMMA, ALFA, BETA, NEUTRONI	26
6.2	Proiectarea geometriilor în SolidWorks pentru utilizare în ANSYS	27
6.2.1	Tranziționarea către ANSYS pentru simulare	27
6.2.2	ANSYS FLUENT SIMULATION	29
6.3	REZULTATE ȘI DISCUȚII	29
6.4	Concluzii	32
7	STUDIUL DE CAZ – AMERICIU-241	33
7.1	DE CE ESTE SELECTAT AM-241 CA SURSĂ DE CĂLDURĂ	33
7.2	PROPRIETĂȚI FIZICO-CHIMICE ALE AM241	33
7.2.1	PROPRIETĂȚI FIZICE	33
7.2.2	PROPRIETĂȚI CHIMICE	34
7.2.3	STRUCTURA CRISTALINĂ	34
7.2.4	Calculul masei de radioizotop	35
7.2.5	Calculul temperaturii de suprafață a radioizotopului	36
7.2.6	COMPARAȚIE AM-241 CU PU-238 ȘI PO-210	37
7.3	CONCLUZII	38
8	CONCLUZII GENERALE	39

Scopul tezei:

Această teză analizează cu atenție rolul în evoluție al generatorilor termoelectrice cu radioizotopi (RTG-uri) în contextul provocărilor energetice globale și al explorării spațiale. Prin integrarea unei perspective istorice cu progresele tehnologice recente, această cercetare abordează importanța strategică a RTG-urilor în reducerea dependenței de sursele tradiționale de energie și îmbunătățirea fiabilității și eficienței sistemelor de alimentare cu energie, atât în medii terestre, cât și extraterestre.

Obiectivul cercetării: Soluții de energie sustenabilă: Această teză evaluează rolul RTG-urilor în furnizarea unor surse de energie fiabile care sporesc sustenabilitatea sistemelor energetice. Aceste sisteme sunt cruciale în zonele îndepărtate de raza soarelui, cum ar fi misiunile în spațiu, și în aplicații unde o alimentare constantă cu energie este crucială, cum ar fi siturile de extracție petrolieră la distanță și sistemele de energie de urgență.

Concluzie: Această teză revizuieste exhaustiv generatorii termoelectrice cu radioizotopi, subliniind rolul lor pivotal în provocările energetice moderne și explorarea spațială. Explorând dezvoltarea lor istorică, dinamica operațională și potențialul de viitor, acest lucru contribuie la discuția academică despre tehnologiile de conversie a energiei și rolul lor crucial în avansarea capacităților tehnologice umane în spațiu și dincolo de acesta.

În căutarea unor noi rezervoare de materiale prime, umanitatea caută să accelereze explorarea spațială.

Fiabilitatea și simplitatea fără egal ale generatoarelor termoelectrice le fac instrumentul preferat în scenarii în care funcționarea neîntreruptă are o importanță mai mare decât eficiența. Gama lor de aplicații cuprinde:

- Surse de alimentare concepute pentru nave spațiale aflate la distanțe semnificative de Soare, unde utilizarea tehnologiei fotovoltaice este nefezabilă;
- Cicluri termale folosite în centrale electrice stationare, cu aplicații potențiale;
- Generatoare utilizate în facilități de extracție a petrolului, cum ar fi platformele offshore;

- Surse de energie electrică utilizate în sistemele de încălzire rezidențiale pentru a alimenta ventilatoarele de circulare a aerului în cazuri de întrerupere a energiei;
- Surse de alimentare destinate aplicațiilor auto, care valorifică căldura reziduală emisă de motoare;
- Generatoare responsabile pentru furnizarea de energie necesare pentru activarea valvei principale în sistemele de încălzire pe gaz, unde generatorul este declanșat de căldură de la flacăra pilot, asigurând că valva principală de gaz rămâne închisă până la aprindere.

1 INTRODUCERE

Termoelectricitatea reprezintă o serie de fenomene ce implică transformarea căldurii provenite dintr-un gradient de temperatură în electricitate și invers. Aceste fenomene includ efectele Seebeck, Peltier, Thomson și cele asociate câmpului magnetic. Generatoarele termoelectrice sunt capabile să fie folosite în diverse aplicații care prioritizează fiabilitatea eficienței, cum ar fi dispozitivele wireless micro autonome, sistemele de monitorizare a sănătății, motoarele auto, industria aerospațială și electronica industrială. De exemplu, un dispozitiv medical destinat monitorizării activității cardiace a unei persoane cu boli de inimă necesită fiabilitate și durabilitate ca principale considerații, în timp ce eficiența are o importanță secundară. Secțiunile abordate în acest segment cuprind dispozitive medicale și purtabile, rețele de senzori wireless (WSNs), domeniul auto, aerospațial, precum și dispozitive electronice și microelectronice. [1, 2, 3]

2 TERMOELECTRICITATE: ASPECTE TEORETICE ȘI APLICAȚII

2.1 EFECTELE TERMOELECTRICE: CONVERSIA DIRECTĂ A ENERGIEI.

2.1.1 EFECTUL SEEBECK

Efectul Seebeck este caracterizat de coeficientul cu același nume și este definit ca raportul dintre tensiunea termoelectrică indusă și diferența de temperatură dintre două puncte pe un conductor electric.

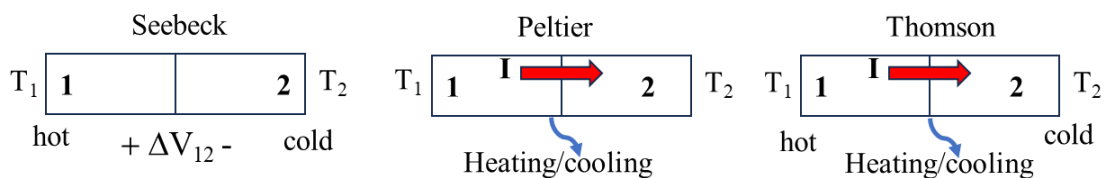


Figure 2-1 Trei efecte termoelectrice: Seebeck – energie electrică extrasă din surse de căldură; Peltier - căldură transportată de curent, Thomson - căldură prin efect joule

2.1.2 EFFECTUL PELTIER

Generarea de căldură atunci când un curent electric (I) trece prin interfața a două materiale, adică efectul Peltier (Jean Peltier, 1834). O joncțiune se încălzește, iar cealaltă se răcește. Acest efect este reversibil atunci când curentul este inversat.

2.1.3 EFFECTUL THOMSON

Orice curent electric care trece printr-un material cu un gradient de temperatură produce (sau absoarbe) căldură, fenomen descoperit de Thomson. Este, de asemenea, un proces reversibil deoarece inversarea direcției fluxului de curent inversează direcția transferului de căldură fără a schimba magnitudinea acestuia.

2.1.4 EFFECTE ÎN CÂMPUL MAGNETIC

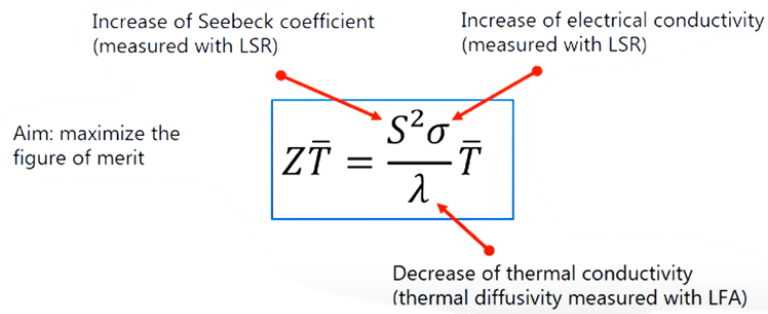
Efectele termoelectrice, similare cu alte proprietăți de transport, suferă modificări când sunt supuse unui câmp magnetic, rezultând apariția unor noi fenomene. Efectele termogalvanomagnetice influențează eficiența dispozitivelor termoelectrice și pot introduce abordări noi în conversia energiei.

2.1.5 EFFECTUL TRANSPORTULUI

Fenomenul termoelectric prezintă reversibilitate, astfel încât nu generează în mod inerent pierderi termodinamice. Cu toate acestea, ele sunt în mod constant însoțite de consecințe ireversibile provenind din rezistența electrică și conducția termică în scenarii practice. Eficiența oricărui termocuplu care funcționează ca un convertor de energie poate fi caracterizată de coeficientul Seebeck diferențial, împreună cu rezistențele termice și electrice ale ramurilor respective. Aceste rezistențe depind de rezistivitatea termică și electrică, precum și de raporturile dintre lungime și aria secțiunii transversale. Se presupune inițial că toate proprietățile rămân neinfluențate de orientare.

2.1.6 FIGURA DE MERIT

Figura de merit (FOM) într-o definiție largă este echivalentă cu producția utilă pe intrarea de energie. În cazul unui termoelement, FOM este definit ca puterea generată de efectul Seebeck și fluxul termic între joncțiunea cald-rece în condiție adiabatică.



2.2 REFERINȚE

-
1. Champier, Daniel. "Thermoelectric generators: A review of applications." *Energy conversion and management* 140 (2017): 167-181.
 2. Jaziri, Nesrine, Ayda Boughamoura, Jens Müller, Brahim Mezghani, Fares Tounsi, and Mohammed Ismail. "A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications." *Energy reports* 6 (2020): 264-287.
 3. Rowe, David Michael, ed. *Thermoelectrics and its Energy Harvesting, 2-Volume Set*. CRC press, 2018.

3 GENERATOARE CU RADIOIZOTOPI ÎN MISIUNILE SPAȚIALE

Provocări și controverse

Cost și Disponibilitatea Materialelor: producția de radioizotopi, combustibilul primar pentru RTG-uri, este costisitoare și complexă, ridicând provocări logistice și financiare.

Considerații Etice și de Mediu: Acest capitol evaluează dezbaterile etice legate de utilizarea materialelor nucleare în explorarea spațială și precauțiile necesare pentru a preveni contaminarea corpurilor cerești conform tratatelor internaționale spațiale.

Concluzie: Generatoarele cu radioizotopi sunt vitale pentru misiunile spațiale, în special cele care se extind dincolo de sistemul solar interior. Acest capitol subliniază rolul lor indispensabil în posibilitățile de lungă durată în medii spațiale aspre unde sursele alternative de energie nu sunt viabile.

3.1 GENERATOARE TERMOELECTRICE CU RADIOIZOTOPI

De ce se folosește energia nucleară în misiunile spațiale?

1 kg de combustibil nuclear = de 10 milioane de ori mai mult decât 1 kg de energie chimică stocată în legăturile chimice.

Interesul de a transforma originea energiei nucleare în energie electrică explică cererea pentru surse de energie sigure și de dimensiuni reduse, care funcționează fără supraveghere și intervenție pentru o perioadă extinsă. Principalele domenii în care astfel de RTG-uri câștigă atenție sunt navele spațiale adaptate pentru explorarea spațiului, oceanelor adânci și mediilor ostile. Explorarea spațiului extraterestru în regiuni întunecate, reci și de lungă durată necesită nave spațiale cu surse de energie electrică și termică fiabile și de lungă durată. Pentru aplicațiile apropiate de Pământ, opțiunea preferată pentru sursa de energie este energia solară (de exemplu, dispozitive fotovoltaice). Această abordare se bazează pe proximitatea relativă față de „sursa de căldură” (Soare). Designerii misiunilor umane dincolo de sistemul solar sau în medii ostile (Marte, Luna, extraplanetare) caută surse de energie independente de radiația solară.

Aceasta este rațiunea pentru a găsi surse de energie de lungă durată pentru a susține explorarea spațială.

Sursele de radioizotopi și generatoarele termoelectrice au o istorie interdependentă lungă legată de explorările spațiale și misiunile pe Pământ pentru balize marine, mediul arctic, radio-meteorologia.

Interacțiunile radiațiilor de la izotopii nucleari cu materia generează energie utilă (electrică și termică) prin dispozitivele de conversie bazate pe diferite efecte fizice și chimice.

Dispozitivele care transformă energia din dezintegrarea radioactivă pentru a genera electricitate sunt generice, definite ca generatoare de radioizotopi, baterii atomice, baterii nucleare, betabaterii și alte definiții echivalente. Electricitatea provine din transformarea energiei nucleare, adică emisiile radioactive continue pentru a genera electricitate și nu din lanțul de fisiune. Aceasta este bateria nucleară inventată de Moseley în 1913. [4]

Există două tipuri de baterii radioactive primare proiectate folosind dezintegrarea alfa, respectiv dezintegrarea beta.

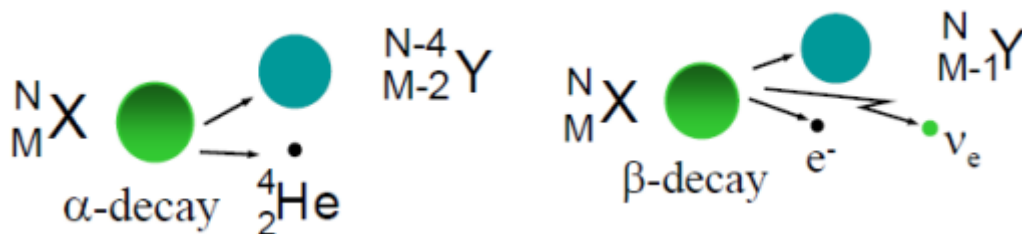


Figura 3-1 Dezintegrare alfa (stânga), dezintegrare beta (dreapta)

Programul ESA Cosmic Vision 2015–2025 în. Sisteme solare și exterioare. Misiuni de explorare lungi [5] sunt în tabelul 2-1

Tabelul 2-1 Misiunea orbital Neptune condusă de ESA.	
Interplanetary mission profile	28 decembrie 2028 Lansare cu Ariane 5 ECA. Două asistență gravitațională (GA): 1 Jupiter GA; Timp de transfer: 15ani. Propulsie: Propulsie electrică solară (SEP, ejectată înainte de zborul lui Jupiter), masa totală a propulsorului de 642 kg.
Neptune mission tour profile	Tur orbital de doi ani (acoperind toate timpurile solare locale și o gamă de inclinații orbitale). 55 de survoluri ale lui Triton (oferind o acoperire globală a suprafeței). Propulsie: chimică, Delta-V total de 3 km/s.
Power sub-system	Generatoare termoelectrice europene cu radioizotopi (10 bucăți) pentru Neptun, cu o putere de 500 W.
Mass budget	Masa umedă a navei spațiale la lansare: 6116 kg Masa umedă a modulului SEP: 1500 kg Masa uscată la Neptun: 1800 kg Masa încărcăturii: 70 kg

Trei tehnologii cheie sunt identificate pentru misiunile spațiale de lungă durată, iar RPG joacă un rol semnificativ în cele trei domenii.

3.2 MISIUNI SPAȚIALE – STUDIU ACTUAL

Jordan și Birden, în 1954, au construit un generator termoelectric cu radioizotopi de 1.8 mWe. Conceptul RTG și-a demonstrat fezabilitatea [6]. Un RTG este compus din două subsisteme: sursa fierbinte - radioizotop cu Pu-238 și convertorul termoelectric.

Alimentarea cu electricitate a roverului Mars 2020 de către NASA este facilitată prin utilizarea unui sistem de alimentare cunoscut sub numele de Generator Termoelectric Radioizotopic Multi-Misiune (MMRTG). Funcționând asemenea unei baterii nucleare, MMRTG captează energia termică derivată din descompunerea naturală a plutoniului-238 pentru a produce aproximativ 110 wați de energie electrică la începutul unei misiuni.

Îmbunătățiri dezvoltate de programul RTG al SUA:

- 1) Microsfere de oxid de Pu-238 și metal Pu-238, sinterizate în cermeți (oxizi ceramic-metal);
- 2) Cupluri termoelectrice sau elemente compuse din semiconductori P-N: materiale pe bază de telurură, utilizabile până la 900 K. Sateliții Forței Aeriene a SUA, LES-8/9, folosesc un aliaj de siliciu-germaniu dopat, la temperatura de operare de ~1300 K;
- 3) Dezavantaje: Pierderea graduală de putere provine de la:

- a) descompunerea naturală a combustibilului
- b) deteriorările/schimbările în proprietățile joncțiunilor semiconductoare. De exemplu, Pu-238 cu un timp de înjumătățire de 87.7 ani pierde 0.8% din puterea sa termică, ce poate fi adăugată la degradarea termo-elementului. Aliajele de telurură sunt mai stabile decât aliajele de Si-Ge;

4) Eficiență 4-8%

New Horizons (nava de 478 Kg) – program spațial către spațiul cosmic exterior [7]. A început cu planeta Pluto, lansat în 2006 și în iulie 2015 avea 110 W, 30V GPHS RTG (aproximativ 200W pierduți pe durata zborului către Pluto). Oxidul de Pu-238 era de 10.9 kg. Alte caracteristici: 16 propulsoare Aerojet care controlează traiectoria. Aceste propulsoare generează 4.4 N (4 buc.), în timp ce 12 buc. generează o forță de 0.9 N. Combustibilul pentru acestea este de 65 kg de hidrazină.

ESA & NASA [8]: RTG la bordul navei spațiale Ulysses - misiune în spațiul adânc. Destinația – măsurători ale regiunii neexplorate de deasupra polilor Soarelui.

Misiunile spațiale ale SUA - rezumatul RTG: Tabelul 2-2 [9, 10, 11] oferă mai multe detalii (45 RTG în 25 de misiuni spațiale).

Tabelul 2-2 Utilizările RTG-urilor de către Statele Unite. detalii pentru fiecare misiune [54]
Transit Navy Navigational Satellites <ul style="list-style-type: none"> ➤ Transits 4A and 4B (1961) SNAP-3B (2.7 We) ➤ Transits 5BN-1 and 5BN-2 (1963) SNAP-9A (>25 We) ➤ Transit TRIAD (1972) Transit-RTG (35 We)
Nimbus-3 Meteorological Satellite <ul style="list-style-type: none"> ➤ SNAP-19B RTGs (1969) (2 @ 28 We each)
Apollo Lunar Surface Experiments Packages <ul style="list-style-type: none"> ➤ Apollos 12 (1969), 14 (1971), 15 (1971), 16 (1972), 17 (1972) ➤ SNAP-27 (>70 We each)
Lincoln Experimental Satellites (Communications) <ul style="list-style-type: none"> ➤ LES 8 and LES 9 (1976) MHW-RTG (2/spacecraft @ 154 We each)
Interplanetary Missions <ul style="list-style-type: none"> ➤ Pioneer 10 (1972) and Pioneer 11 (1973) SNAP-19 (4/spacecraft @ 40 We each) ➤ Viking Mars Landers 1 and 2 (1975) SNAP-19 (2/Lander @ 42 We each) ➤ Voyager 1 and Voyager 2 (1977) MHW-RTG (3/spacecraft @ 158 We each) ➤ Galileo (1989) GPHS-RTG (2 @ 288 We each) (>3-year delay) ➤ Ulysses (1990) GPHS-RTG (289 We) (>4-year delay) ➤ Cassini (1997) GPHS-RTG (3 @ 295 We each)

➤ New Horizons (2006) GPHS-RTG (1 @ 245.7 We) (most of fuel >21 years old)

Abr: **SNAP** is an acronym for Systems for Nuclear Auxiliary Power. **MHW-RTG** = Multi-Hundred Watt RTG. **GPHS-RTG** = General-Purpose Heat Source-RTG

3.2.1 PROGRAMUL ESA

Programul european de explorare include misiuni lunare, programul „Gateway”, pregătirea pentru viitoarele misiuni pe Marte (inclusiv returnarea de eșantioane), misiuni în spațiul adânc, giganți și sateliți.

3.2.2 RTG DE TIP RUSESC ȘI ALTE APLICAȚII

- Fosta Uniune Sovietică a implementat cu succes RTG-uri (Generatoare Termoelectrice cu Radioizotopi) pe:
 - Cosmos 84 și Cosmos 90: două nave spațiale orbitante terestre
 - Lunokhod-1 și Lunokhod-2: două roveruri lunare
 - Generator termoelectric BUK pentru observații radar marine.
 - Două reactoare termionice experimentale (denumite TOPAZ) pe sateliții orbitanți terestri Cosmos 1818 și Cosmos 1867. [12, 13].

3.3 UNITĂȚI DE ÎNCĂLZIRE CU RADIOIZOTOPI (RHUs)

RHUs sunt unități de putere termică ce folosesc radioizotopul bazat pe plutoniu-238.

Figura 3-2 arată componentele generației actuale de unități de încălzire cu radioizotopi ușoare (LWRHU - Light-Weight Radioisotope Heater Unit), proiectate pentru a furniza o putere termică nominală de 1Wt.



Figure 3-2. LWRHU- light-weight radioisotope heater unit, components

Selecția adecvată a izotopilor și a radiației corespunzătoare, împreună cu componentele specifice, sunt factori esențiali de luat în considerare în dezvoltarea unui sistem termic care convertește eficient energia nucleară din izotopi în energie electrică printr-un proces de conversie.

3.4 CONCLUZII

Sursele de căldură alimentate cu Pu-238 au fost supuse unor teste extinse de calificare pentru zbor și au prezentat o performanță consistentă în toate Sistemele de Putere cu Radioizotopi (RPS) utilizate în programul spațial al Statelor Unite până în prezent. Principala provocare asociată cu Pu-238 se referă la disponibilitatea sa restricționată, care a fost o problemă persistentă în ultimul jumătate de secol din cauza faptului că producția și procesarea combustibilului Pu-238 depind de fabricarea materialelor pentru arme nucleare. Încetarea acestui proces de producție în anii 1990 a dus la eliminarea metodelor convenționale de generare a Pu-238. Ulterior, în anii 2000, Statele Unite au început achiziționarea de Pu-238 din Rusia. Cu toate acestea, această sursă de aprovizionare are și ea limitările sale, subliniind necesitatea imperioasă a reluării producției în viitorul previzibil. RTG-urile au independență față de radiația solară.

Dezavantajele Generatoarelor Termoelectrice cu Radioizotopi (RTG-uri) sunt următoarele:

- a) Cheltuielile asociate cu aceste unități, în special costurile legate de izotop, sunt un factor semnificativ.
- b) Cheltuielile monetare pentru munca necesară pentru a demonstra respectarea reglementărilor de siguranță constituită o considerație crucială.
- c) Declinul puterii în timp este o consecință a deteriorării induse de radiații a unităților și a procesului de descompunere nucleară.
- d) Este imposibil de dezactivat fie producția de energie, fie producția de căldură.
- e) Radiațiile emise rezerve de amenințare pentru electronice și instrumente, necesitând utilizarea unei brațe extensibile.

În concluzie, Generatoarele Termoelectrice cu Radioizotopi (RTG-uri) nu sunt folosite când panourile solare sunt o alternativă fezabilă.

4 GENERATOARE TERMOELECTRICE

4.1 GENERATOARE TERMOELECTRICE CU COMBUSTIBILI FOSILI (TGFF)

Generatoarele termoelectrice (TEG-uri) care utilizează combustibili fosili gazoși sau lichizi au cunoscut o expansiune semnificativă în ultimii ani. Aceste dispozitive găsesc aplicații practice în aplicații unde sursele de energie durabile și fiabile sunt cruciale, cum ar fi în protecția catodică a conductelor de petrol și gaze și a liniilor de releu radio. Prin aplicarea unui potențial negativ, aceste sisteme previn oxidarea fierului în conducte, atenuând eficient coroziunea. În plus, potențialul TEG-urilor de a recupera energia pierdută de la motoarele cu ardere internă oferă o nouă perspectivă asupra creșterii eficienței energetice în medii îndepărtate și provocatoare.

Concluzie: Acest capitol conturează integrarea inovatoare a combustibililor fosili cu tehnologia generatorului termoelectric, ilustrând rolul lor crucial în îmbunătățirea eficienței energetice și sustenabilității în sectoarele staționare și dinamice. Prin detalierea contextului operațional, a metricilor de eficiență și a proiectelor specifice ale TEG-urilor, teza oferă o vedere cuprinzătoare asupra modului în care aceste sisteme pot fi optimizate pentru a aborda eficient provocările energetice globale.

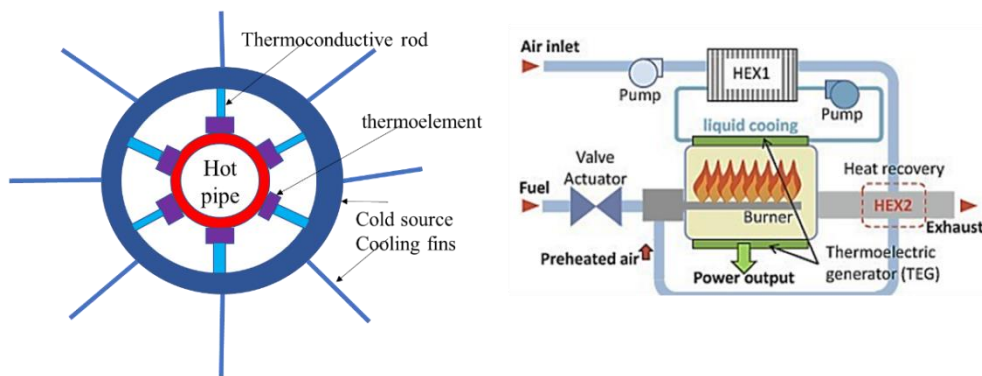


Figure 4-1 a) Basic principle for a thermoelectric generator using fossil fuel (left)- cylindrical geometry, b) Integration fuel-burning TEG: liquid-to-air heat exchanger (HEX1), combustion chamber. HEX 2-Exhaust heat, recovered through a second gas-to-gas heat exchanger [14]

4.2 BATERIA BETAVOLTAICĂ

4.2.1 BATERIE NUCLEAZĂ REZONANTĂ

Bateria nucleară rezonantă, un design inovativ dezvoltat de Paul Brown, utilizează energia provenită de la produsele de dezintegrare radioactivă pentru a susține și amplifica oscilațiile într-un circuit LC de înaltă calitate (Q), optimizând conversia energiei de dezintegrare nucleară în energie electrică. Elementul central al structurii circuitului este un inductor compus dintr-o bobină înfășurată în jurul unui nucleu umplut cu nuclei radioactivi, de obicei, o combinație de trei substanțe radioactive care suferă predominant emisii alfa. Această compoziție specifică nu doar că sporește randamentul produselor de dezintegrare radioactivă, dar și crește semnificativ eficiența bateriei. În plus, nucleul este conectat în serie cu înfășurarea primară a unui transformator de putere, transformând astfel dezintegrarea nucleară în energie electrică utilizabilă.

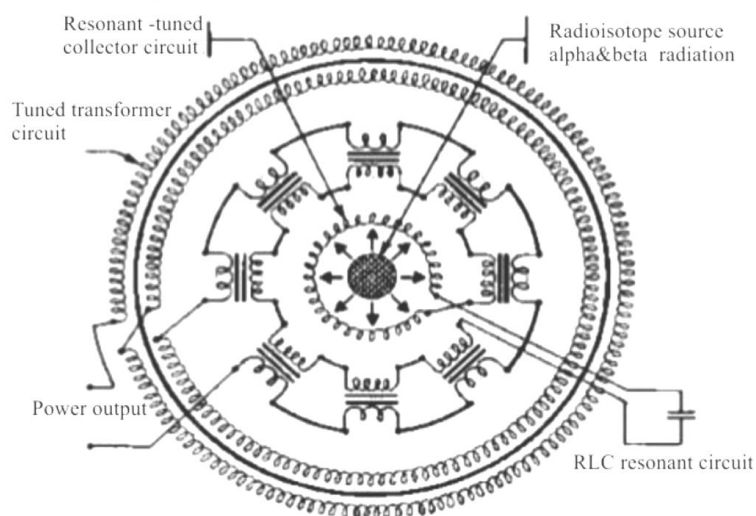


Figure 4-2 Bateria nucleară rezonantă. Energia radiației de la materialul radioactiv este convertită direct într-un curent electric alternativ continuu. Prototipul de energie al lui Brown generează de 100.000 de ori mai multă energie pe gram de stronțiu-90 (sursa de energie) decât cea mai puternică baterie nucleară termică existentă până acum. Bateria a produs 7500 de wați pe gram de stronțiu-90. Dezavantaje: Sarcinile electrice ale particulelor alfa și beta sunt compensate reciproc, rezultând o putere mică. Coliziunile succesive ale particulelor cu moleculele de aer sau alte molecule reduc randamentul.

4.2.2 PREZENTARE GENERALĂ A CELULELOR BETAVOLTAICE

Celulele betavoltaice, sau dispozitivele betavoltaice, reprezintă o formă specializată de tehnologie a bateriilor nucleare, concepute pentru aplicații la scară mică, unde Generatoarele Termoelectrice Radioactive (RTGs) sunt impracticabile. Aceste dispozitive utilizează dezintegrarea beta a izotopilor precum tritiul - provenind de la facilitățile de energie nucleară - pentru a genera energie electrică. Adoptarea tritiului în celulele betavoltaice subliniază o strategie eficientă pentru reutilizarea subproduselor nucleare, aliniindu-se cu practicile sustenabile în gestionarea deșeurilor nucleare.

Performanță și Limitări: În ciuda aplicării inovative a dezintegrării nucleare în generarea de energie, celulele betavoltaice oferă o putere limitată, semnificativ mai mică decât cea a bateriilor chimice convenționale. De exemplu, o celulă betavoltaică cu dimensiuni de un centimetru pătrat în lățime și două zecimi de centimetru în înălțime produce doar un microwatt de putere. Această producție este extrem de insuficientă în comparație cu cerințele de putere ale electronicii de consum moderne, cum ar fi smartphone-urile, care pot necesita aproximativ 1857 de milivați pentru operațiuni tipice, inclusiv utilizarea activă a CPU-ului, conectivitate Wi-Fi și afișajul ecranului. Această limitare restrânge aplicarea practică a celulelor betavoltaice în principal la dispozitivele cu consum redus de energie care necesită surse de energie de lungă durată fără a necesita o ieșire de înaltă putere.

4.3 **MISIUNI AMERICANE FOLOSIND SISTEME DE PUTERE CU RADIOIZOTOPI**

Utilizarea Sistemelor de Putere cu Radioizotopi (RPS) în misiunile efectuate de Statele Unite (unde trei misiuni au fost nereușite din cauza eșecurilor vehiculului de lansare sau a navei spațiale) este descrisă în legătură cu RTG-urile care au funcționat în spațiul cosmic. RTG-urile au demonstrat capacitatea lor de a funcționa în condiții ostile, fiind în același timp sigure și fiabile, având o durată de viață operațională îndelungată. RTG-urile utilizate în misiunile spațiale includ șapte variații fundamentale: SNAP-3/3B, SNAP-9A, SNAP-19/19B, SNAP-27, TRANSIT-RTG, MHW-RTG și GPHS-RTG.

Acronimul SNAP înseamnă Sisteme pentru Putere Auxiliară Nucleară și semnifică un program creat de Comisia pentru Energie Atomică (AEC). Acest program a fost responsabil pentru crearea generatoarelor destinate aplicațiilor pe Pământ, nu în spațiu.

Toate misiunile care au utilizat RPS începând cu anul 1989 s-au axat pe GPHS-RTG, o dezvoltare recentă proiectată pentru utilizare generală în unități de putere auxiliare.

4.4 CONCLUZII

Bateriile nucleare continuă să fie extrem de costisitoare și lente în furnizarea energiei pentru bunurile de consum. De asemenea, un component crucial al bateriilor nucleare este subprodusul centralelor nucleare, stabilind astfel o dependență a sectorului bateriilor nucleare de cel al producerii energiei nucleare. Cu toate acestea, tehnologiile emergente care permit dezvoltarea unor baterii nucleare mai mici, mai sigure, mai eficiente și mai durabile indică o perspectivă promițătoare pentru aplicațiile bateriilor nucleare în piețele specializate menționate anterior. Pe măsură ce cheltuielile de fabricație ale bateriilor nucleare scad, este plauzibil ca dispozitivele cu consum redus de energie din rețeaua internetului lucrurilor să poată opera în mod wireless pentru perioade extinse cu o singură încărcare prin această inovație revoluționară.

4.5 REFERINȚE

-
4. H. G. J. Moseley, and J. Harling, The Attainment of High Potentials by the Use of Radium, Proc. R. Soc. (London) A, 88, 471 (1913).
 5. Masters, Adam, Nick Achilleos, C. B. Agnor, Stefano Campagnola, S. Charnoz, Bruno Christophe, Andrew J. Coates et al. "Neptune and Triton: Essential pieces of the Solar System puzzle." *Planetary and Space Science* 104 (2014): 108-121.
 6. Corliss WR, Harvey DG. Radioisotopic power generation. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.; 1964.
 7. https://en.wikipedia.org/wiki/New_Horizons
 8. <https://www.cosmos.esa.int/web/ulysses/spacecraft>
 9. Bennett Gary L, Lombardo James J, Rock Bernard J. US radioisotope thermoelectric generator space operating experience (June 1961– December 1982). In: Proceedings of the 18th intersociety energy conversion engineering conference, held in Orlando, Florida, 21–26 August 1983. Reprinted in *The Nuclear Engineer*, vol. 25 (No. 2); 1984. p. 49–58.
 10. Bennett Gary L, Skrabek EA. Power performance of US radioisotope thermoelectric generators. In: Proceedings of the ICT '96, 15th international conference on

-
- thermoelectrics, held in Pasadena, California, 26–29 March 1996. IEEE Catalog Number 96TH8169. Library of Congress Number 96-75531. p. 357–72.
11. Bennett Gary L. Space nuclear power. Encyclopedia of physical science and technology. 3rd ed., vol. 15. New York: Academic Press; 2002. p. 537–53
 12. Ponomarev-Stepnoi Nikolai N, Talyzin Victor M, Usov Veniamin A. Russian space nuclear power and nuclear thermal propulsion systems. Nuclear News 2000;43(13):33–46.
 13. Bennett Gary L. A look at the soviet space nuclear power program, Paper Number 899009. In: Proceedings of the 24th intersociety energy conversion engineering conference, held in Crystal City, Virginia, 6–11 August 1989.
 14. Yazawa, Kazuaki, and Ali Shakouri. "Fuel-burning thermoelectric generators for the future of electric vehicles." Energy Conversion and Management 227 (2021): 113523.

5 STUDIUL EXPERIMENTAL

5.1 OXIDUL DE COBALT SODIU (Na_xCOO_2)

5.1.1 PREZENTARE GENERALĂ A OXIZILOR DE COBALT CA MATERIALE TERMOELECTRICE

Oxizii de cobalt sunt tot mai recunoscuți pentru reacțiile lor versatile în diferite condiții.

Ei prezintă o gamă de proprietăți, inclusiv superconductivitate la temperaturi scăzute, efecte termoelectrice bune la temperatura camerei și conductivități ionice și magnetice notabile. Aceste materiale sunt de asemenea cunoscute pentru tranzițiile lor de la izolator la metal (IMT) și tranziții semnificative de magnetorezistență (MR).

5.1.2 PROPRIETĂȚI ALE OXIDULUI DE COBALT SODIU (Na_xCOO_2)

Performanța termoelectrică a Na_xCoO_2 variază în funcție de concentrația de sodiu.

Proprietățile termoelectrice optime sunt întâlnite între $0.5 < x < 0.60$, arătând feromagnetism stabil, și ating un vârf între 0.85 și 0.9 unde se observă o creștere a conductivității și a factorului de putere. Nivelele de sodiu de la $0.62 < x < 0.67$ produc stări antiferomagnetice cu un coeficient Seebeck de aproximativ $100 \mu\text{V/K}$, în timp ce concentrațiile mai mari promovează ordonarea magnetică pe distanțe lungi și formarea de polaroni. Depășirea conținutului de Na dincolo de unitate duce la o stare de undă de densitate de spin (SDW) și la o rezistență ridicată, reducând semnificativ factorul de putere.

5.1.3 APLICAȚII ALE Na_xCOO_2

Na_xCoO_2 este potrivit pentru diverse aplicații, de la generatoare termoelectrice și dispozitive de răcire până la sisteme de recuperare a căldurii reziduale. Capacitatea sa de a converti diferențele de temperatură în energie electrică îl face valoros pentru generarea de energie la scară mică, mai ales când eficiența energetică este crucială, cum ar fi pentru sateliți, stații meteorologice la latitudini extreme și exploratori oceanici.

5.1.4 REZULTATE ȘI DISCUȚII

Prepararea soluțiilor: Sinteza a început cu pregătirea a două soluții separate pentru a asigura omogenitatea:

- Soluția A: A constă din 0,15 moli de nitrat de sodiu (NaNO_3) și 0,05 moli de acid citric ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) dizolvate în 150 mL de apă deionizată.
- Soluția B: A implicat dizolvarea a 0,1 moli de nitrat de cobalt hexahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) și 0,1 moli de acid citric ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) în alți 150 mL de apă deionizată.

Cele două soluții au fost apoi combinate cu 300 mL de etilen glicol, formând un amestec deionizat și apoi agitat la 353 K (80°C) timp de o oră. Această încălzire și amestecare au fost critice pentru obținerea unui amestec omogen. Ulterior, temperatura amestecului a fost crescută la 393 K (120°C) pentru a iniția formarea gelului. Acest pas este crucial deoarece stimulează reacțiile de policondensare necesare dezvoltării gelului.

Conversia gelului în pulbere: Odată format, gelul a fost supus unui tratament termic suplimentar pentru a-l transforma într-o pulbere omogenă. Aceasta a implicat menținerea gelului la temperaturi ridicate până când s-a transformat în cenușă, indicând finalizarea descompunerii componentelor organice.

Presare și formare: Pulberea rezultată a fost apoi comprimată sub 3-4 tone pentru a forma pelete cilindrice (pastile). Aceste pastile au avut un diametru de 3 mm și o înălțime de 2 mm, dimensiuni care sunt potrivite pentru testări ulterioare și utilizare în aplicații termoelectrice.

Procesul de sinterizare: În final, pastilele modelate au fost sinterizate la 973 K (700°C) timp de 9 ore. Sinterizarea este esențială pentru îmbunătățirea densității și rezistenței mecanice a pastilelor, precum și pentru îmbunătățirea conectivității electrice și termice între granule, ceea ce este crucial pentru performanța eficientă a materialelor termoelectrice.

Concluzie: Acest proces de sinteză conturează pașii critici implicați în producerea oxidului de cobalt sodiu (Na_xCoO_2) prin metoda sol-gel. Controlul meticol al proporțiilor chimice, temperaturii și timpului la fiecare etapă asigură producția unui

material de înaltă calitate, caracterizat prin performanța sa termoelectrică potențială ridicată. Procedura detaliată evidențiază transformările chimice și fizice de la stadiul soluției la produsul final sintetizat, oferind o bază pentru cercetare și aplicații ulterioare în tehnologiile de conversie a energiei.



Figure 5-1 NaCoO tablets (30 mm)

5.1.4.1.1 Seebeck with and without magnetic

Configurație experimentală pentru măsurători: Toate proprietățile termoelectrice sunt măsurate în două condiții: cu magnet și fără magnet, după care observațiile sunt comparate.

Seebeck cu și fără magnet

- Material resulted from synthesis:
 - $\frac{\text{Na}}{0.57} \text{CoO}_2$

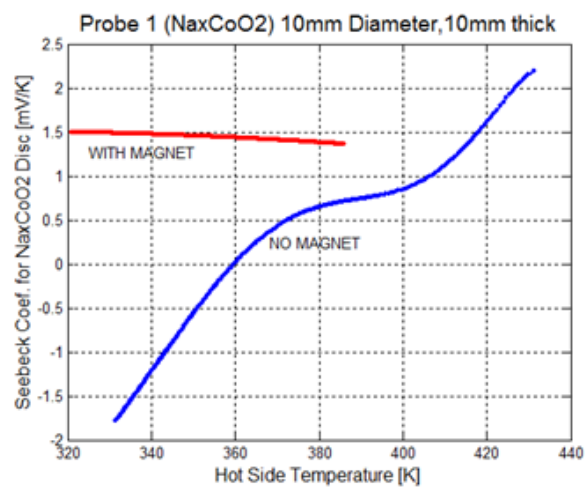


Figure 5-2 The Seebeck coefficient ratio to the temperature difference.

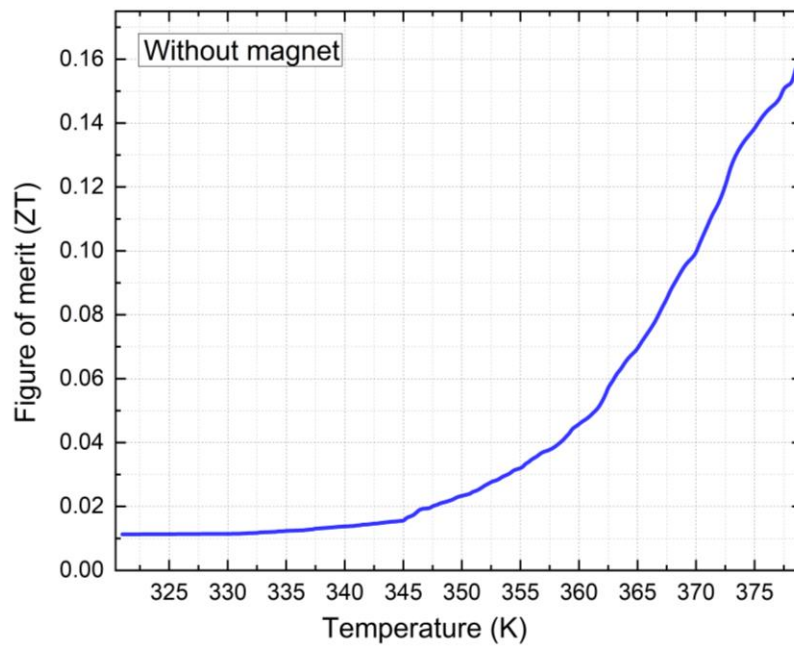


Figure 5-3 Figure of merit ZT analysis for Na_xCoO_2 without magnetic field

Totuși, sub influența câmpului magnetic, se observă o creștere accentuată a valorii ZT într-un anumit interval de temperatură. Această creștere semnificativă sugerează o îmbunătățire considerabilă a eficienței termoelectrice datorată câmpului magnetic, care ar putea fi atribuită mobilității modificate a purtătorilor de sarcină sau alinierii magnetice care afectează procesele de dispersie a electronilor în cadrul materialului.

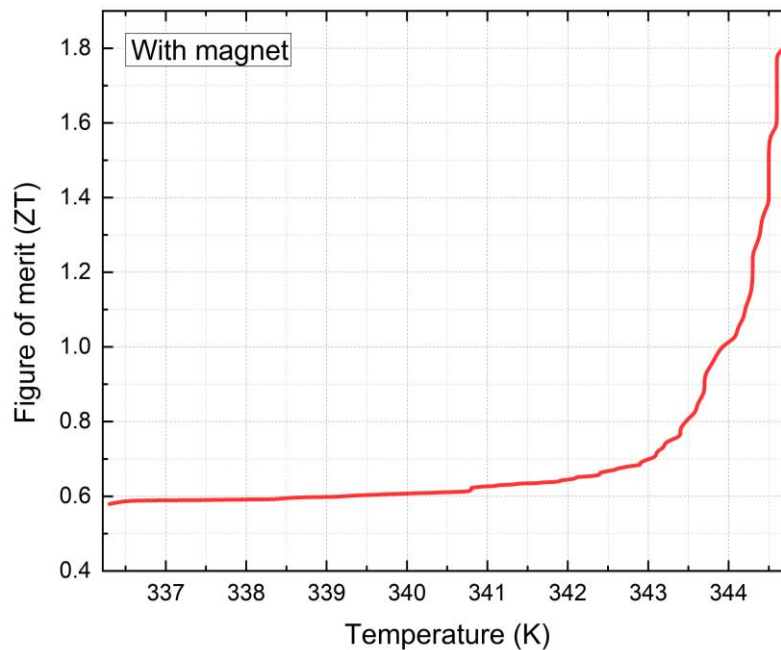


Figure 5-4. Figure of merit ZT analysis for Na_xCoO_2 with magnetic field

5.1.4.1.2 Efectul apei sau al umidității asupra Na_xCoO_2

Conform observațiilor din experimente, o concentrație de $x \approx 0,85$ de sodiu pur pare ideală pentru obținerea unei puteri termoelectrice mari și a unor constante Seebeck mari, de peste 1500 $\mu\text{V}/\text{K}$. Substituția ionilor de sodiu cu un anumit număr de goluri în stratul de cobalt oferă posibilitatea de a îmbunătăți și mai mult performanța termoelectrică. Unele probe policristaline au deja o concentrație minimă de 0,6-0,65 Na (sau formula $\text{Na}_{1-x}\text{R}_x\text{CoO}_2$) dopată cu $\text{R}=\text{Ca}$, Bi și/sau Sr în proporții de 0,15-0,2, prezentând o creștere semnificativă (de 3 ori) a factorului de putere în comparație cu compusul pur de cobaltit de sodiu. Se preconizează obținerea de valori și mai mari cu adăugarea de apă și magnet. În probele pure de Na_xCoO_2 cu $x > 0,8$, adăugarea de apă crește curentul total de la 30 până la o valoare maximă de 300 μA la 340 K, iar puterea este crescută de zece sau chiar de 100 de ori față de valoarea inițială (fără magnet și apă). Dezavantajul la atingerea temperaturii de 340 K este că apa începe să se evapore rapid, iar puterea totală scade rapid în mai puțin de 3 minute. O soluție la această problemă este să se utilizeze apa pentru temperaturi ale părții calde mai mici de 320 K și să se înghețe apa pe partea rece, obținându-se același sau chiar un gradient de temperatură mai bun decât în primul caz.

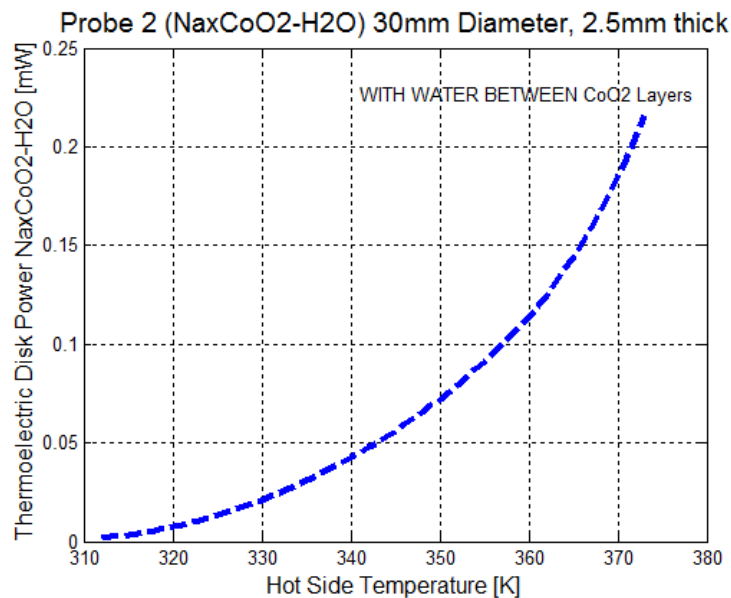


Figure 5-5- The effect of water on the thermoelectric power.

5.1.5 CONCLUZII

Proprietățile termoelectrice ale Na_xCoO_2 au fost testate de la temperatura camerei până la 400K, observându-se creșteri semnificative ale puterii sub influența unui câmp magnetic, în special până la 380K, înainte de a scădea datorită pierderii proprietăților magnetice după temperatura Curie. Fără câmp magnetic, curbele de date se suprapuneau, pe când cu acesta, ele divergeau după 345K. Introducerea apei între straturile de CoO_2 și Na a îmbunătățit semnificativ generarea de energie.

5.2 **SINTEZE PE BAZĂ DE BACOCA. PROPRIETĂȚI TERMOELECTRICE ȘI CARACTERIZĂRI**

5.2.1 INTRODUCERE

Trei tipuri de ceramici termoelectrice din oxid de cobalt, dopate cu bariu și stabilizate cu calciu, au fost sintetizate prin metoda sol-gel folosind acid citric și etilen glicol ca agent de gelificare și combustibil, respectiv. Experimentele au evaluat impactul varierii rapoartelor molare de acid citric (50, 100, 75 grame) și etilen glicol (10, 20, 15 grame) asupra proprietăților termoelectrice ale acestor materiale. Probele cilindrice cu diametrul de 30mm și grosimea de 2.5mm au fost testate pentru coeficientul lor Seebeck și rezistivitatea electrică de la temperatura camerei până la 473K. Cele mai bune rezultate au fost observate în proba cu 75 de grame de acid citric și 15 grame de etilen glicol, atingând un coeficient Seebeck pozitiv ridicat de aproximativ 230 $\mu\text{V/K}$ la 473K, indicând conductivitate de tip p.

5.2.2 MATERIALE ȘI PROCEDURA DE SINTEZĂ

Compușii BaCaCoO au fost sintetizați folosind metoda sol-gel a citratului. Ingredientele, incluzând 9,5 grame de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 1,0 gram de $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ și 15,0 grame de $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, au fost dizolvate în 150 mL apă deionizată și amestecate la 253K timp de 1 oră. Acidul citric, în cantități de 50, 75 sau 100 de grame, a fost adăugat treptat în 100 mL apă, alături de 10, 15 sau 20 mL de Etilen Glicol, încălzite la 393K timp de 1 oră, apoi temperatura a fost crescută la 673K pentru eliberarea gazelor și formarea unei pulberi. Pulberea a fost apoi presată în pastile, sinterizată la 773K timp de 5 ore și ulterior sinterizată la 1173K timp de 9 ore pentru a îmbunătăți proprietățile mecanice.

5.2.3 REZULTATE ȘI DISCUȚII

Tensiunea și coeficientul Seebeck a trei probe ceramice cu cantități variate de acid citric și etilen glicol au fost analizate la diferite temperaturi. Mostra 3, cu 75 g de acid citric și 15 mL de etilen glicol, a arătat cea mai mare creștere a tensiunii pe măsură ce temperatura creștea, indicând potențialul pentru producția unei tensiuni mai mari la temperaturi ridicate. Mostra 1 a afișat o tensiune consistentă până la 190°C, după care a scăzut, în timp ce Mostra 2 a prezentat o creștere mai liniară a tensiunii, dar la niveluri mai scăzute decât celelalte. În ceea ce privește coeficientul Seebeck, toate cele trei probe au demonstrat o tendință ascendentă odată cu creșterea temperaturii, dar cu modele distincte. Coeficientul Seebeck al Mostrei 1 a crescut treptat până la 160°C, apoi brusc după aceea. Mostra 2 a menținut o valoare inițială mai mare și a crescut constant, în timp ce Mostra 3 a văzut o creștere abruptă între 140°C și 160°C, stabilizându-se ușor după 180°C înainte de a crește rapid la niveluri de vârf.

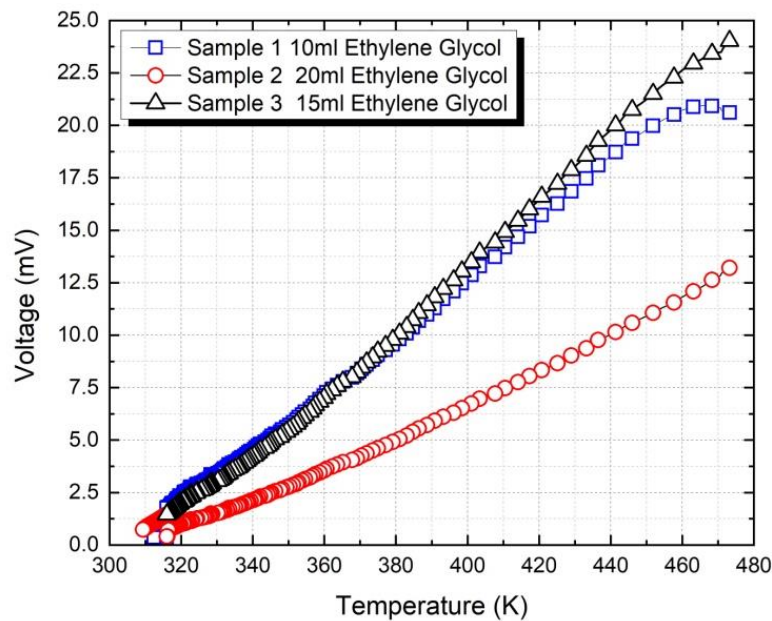


Figure 5-6. Voltage variation with hot side temperature in three samples

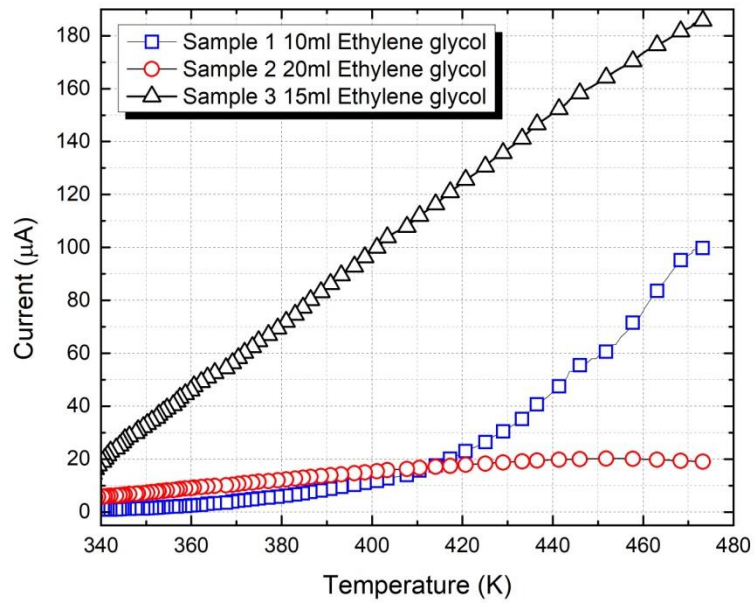


Figure 5-2 The Current for three samples dependent on the hot side temperature.

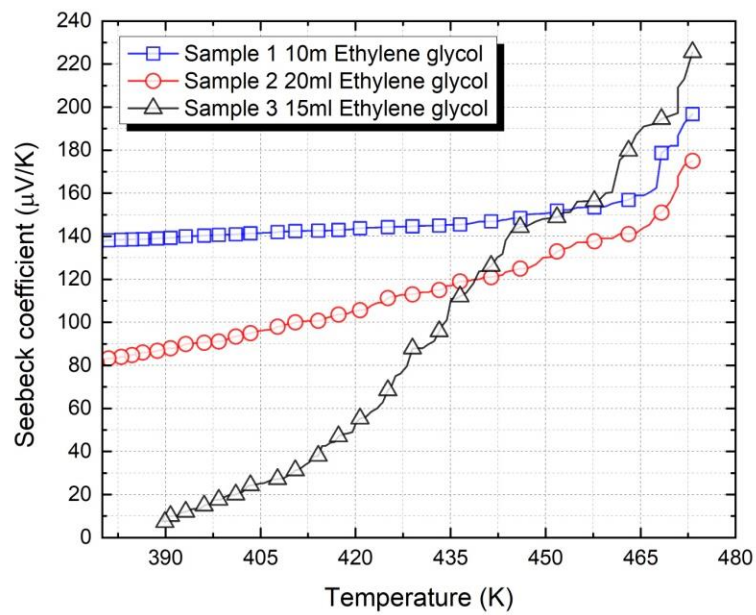


Figure 5-3- The Seebeck coefficient is increasing with rising temperature

Valoarea ZT a fost optimizată și a înregistrat o creștere remarcabilă pentru proba 3. Prin urmare, având în vedere valorile ZT pentru cele trei probe, cel mai bun material pentru aplicarea într-un convertor termoelectric este proba 3.

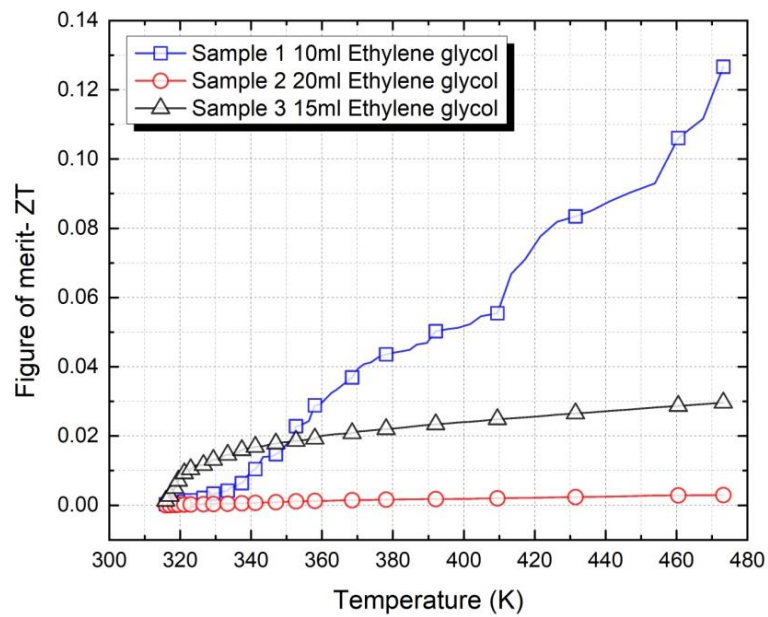


Figure 5-9. Figure of merit ZT for the BaCaCoO

5.2.4 CONCLUZII

Prin adăugarea unei cantități mai mari de acid citric în soluția inițială, proprietățile termoelectrice ale materialului rezultat sunt semnificativ îmbunătățite. Totuși, trebuie observat că creșterea cantității de acid trebuie să fie optimă, deoarece o creștere ulterioară va reduce proprietățile termoelectrice ale materialului. La fel se întâmplă și în cazul. Inițial, proprietățile termoelectrice sunt îmbunătățite prin creșterea cantității de glicol etilenic de la 10 mL la 15 mL, dar în cazul unei creșteri excesive la 20 mL, proprietățile termoelectrice sunt reduse drastic.

6 TRANSFER DE CĂLDURĂ ÎN RTG - MODELARE ȘI SIMULARE

Instrumentele de simulare, în special ANSYS, au revoluționat abordarea designului, analizei și optimizării în diverse domenii ale ingineriei, inclusiv dezvoltarea Generatoarelor Termoelectrice cu Radioizotopi (RTGs) și a altor sisteme de conversie a energiei. Acest capitol explorează-le multifacetate ale utilizării ANSYS, a avantajului preciziei designului până la facilitarea soluțiilor inovative în managementul termic și eficiența energetică. Apoi, raportul ANSYS pentru RTG este studiat și investigat în termeni de transfer termic și distribuție a temperaturii pentru a alege cea mai bună geometrie, structură și aripioare.

ANSYS oferă un mediu de simulare versatil pentru modelarea fenomenelor fizice complexe, cuprinzând dinamica fluidelor, transferul termic și mecanică structurală.

6.1 MATERIALE PENTRU TERMALIZARE ȘI PROTECȚIE ÎMPOTRIVA RADIATIILOR X, GAMMA, ALFA, BETA, NEUTRONI

Materialele de protecție împotriva diferitelor tipuri de radiații depind de caracteristicile specifice ale fiecărui tip.

Raze X și Raze Gamma: Plumb: Plumbul este un material frecvent utilizat pentru protecția împotriva razelor X și razelor gamma datorită densității sale mari, care absoarbe și atenuează eficient aceste tipuri de radiații.

Beton: Straturile groase de beton sunt, de asemenea, eficiente în blocarea razelor X și razelor gamma.

Particule Alpha: Hârtie: Particulele alfa pot fi oprite de o foaie de hârtie sau câțiva centimetri de aer. Aceste particule sunt relativ mari și încărcate pozitiv, interacționând puternic cu materia. Straturi subțiri de plastic sau metal: În timp ce particulele alfa pot fi oprite de materiale cu densitate scăzută, materialele mai groase precum plasticul sau metalul pot oferi o protecție mai fiabilă.

Particule Beta: Aluminiu: Particulele beta pot fi ecranate cu materiale cu numere atomice scăzute, cum ar fi aluminiul. Aluminiul este utilizat frecvent datorită protecției

eficiente pe care o oferă în timp ce este relativ ușor. Plexiglas (acrilic): Plexiglas (acrilicul) este un alt material care poate proteja eficient împotriva particulelor beta.

Neutroni: Materiale bogate în hidrogen: Neutronii pot fi ecranati eficient de materiale care conțin atomi de hidrogen, cum ar fi apă, parafină sau polietilenă. Atomii de hidrogen sunt eficienți în încetinirea neutronilor prin procese de dispersie elastică. Materiale borate: Borul este eficient în absorbția neutronilor. Materialele borate, cum ar fi polietilena borată sau sticla borosilicată, sunt utilizate pentru protecția împotriva neutronilor în unele aplicații.

Grafitul este un material interesant în ceea ce privește protecția împotriva radiațiilor, în special a neutronilor. Grafitul poate fi un material eficient pentru protecția împotriva neutronilor, în special în aplicațiile în care se dorește moderarea acestora. Totuși, pentru o protecție cuprinzătoare împotriva radiațiilor, este adesea utilizat în combinație cu alte materiale adaptate tipurilor specifice de radiații prezente în mediu. În contextul reactorilor nucleari sau al altor medii în care se generează radiații, termalizarea se referă la procesul de încetinire a neutronilor rapizi la neutroni termici (sau cu energie redusă) prin coliziuni cu materialul. Materialele bune termalizatoare încetinesc eficient acești neutroni rapizi

6.2 PROIECTAREA GEOMETRIILOR ÎN SOLIDWORKS PENTRU UTILIZARE ÎN ANSYS

Integrarea SolidWorks și ANSYS oferă un cadru robust pentru proiectarea și analiza sistemelor de inginerie, în special în dezvoltarea tehnologiilor de conversie a energiei, precum Generatoarele Termoelectrice cu Radioizotopi (RTGs). Acest capitol conturează abordarea sistematică a creării geometriilor în SolidWorks și analiza ulterioară a acestora în ANSYS, subliniind fluxul de lucru continuu care facilitează inovația în design și optimizare.

6.2.1 TRANZIȚIONAREA CĂTRE ANSYS PENTRU SIMULARE

Geometria proiectată în SolidWorks este apoi pregătită pentru simulare în ANSYS. Această tranziție implică mai mulți pași cheie:

- Considerarea privind sursa de căldură: Nucleul designului RTG implică radioizotopul, care acționează ca sursă de căldură, encapsulat într-o geometrie

cilindrică cu diametrul de 20 mm. Această configurație este crucială pentru generarea și transferul eficient al energiei termice în cadrul sistemului.

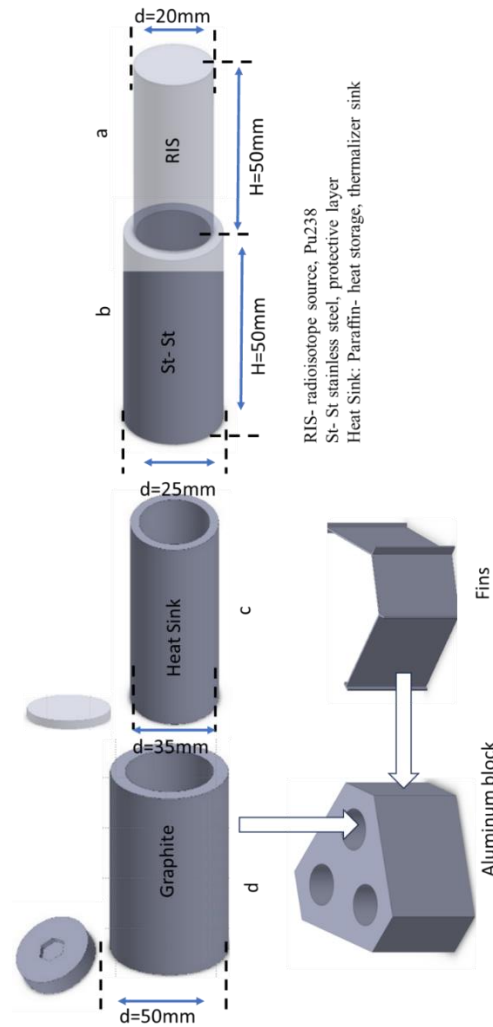


Figure 6-1 Module of Radioisotope thermal source (RTG) generator; RIS- radioisotope source, Pu238; St- St stainless steel, protective layer; Heat Sink: Paraffin- heat storage, thermalizer sink

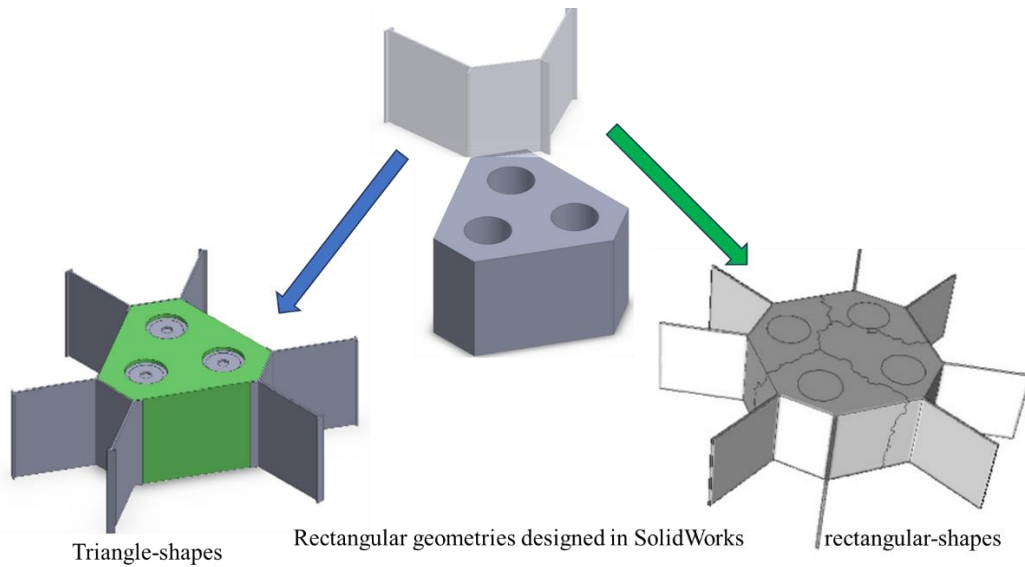


Figure 6-2 Shapes designed by solid works containing into aluminum block with dissipative fins, RTGs

6.2.2 ANSYS FLUENT SIMULATION

Această secțiune a tezei delimitează analiza comprehensivă realizată în ANSYS Fluent pentru a elucida comportamentul termic al RTG-urilor cu configurații geometrice distincte. Fluxul de lucru a cuprins importul modelelor, generarea plasei, configurarea ecuațiilor, specificarea condițiilor de contur, inițializarea parametrilor de simulare și executarea simulării, oferind o abordare sistematică pentru evaluarea performanței termice a designurilor RTG triunghiulare și rectangulare.

6.3 REZULTATE ȘI DISCUȚII

Rezultatele simulării ANSYS Fluent pentru cele două geometrii distincte, triunghiulară și rectangulară, proiectate pentru Generatoarele Termoelectrice cu Radioizotopi (RTGs), au arătat diferențe nuanțate în caracteristicile transferului de căldură. Această secțiune discută comportamentul termic expus de ambele geometrii în condiții inițiale și de frontieră identice.

Ambele geometrii au fost supuse condițiilor de curgere laminară cu aceleași proprietăți ale materialelor și intensități identice ale sursei de căldură pentru a simula transferul de căldură din centru, care a fost aplicat în locul unei surse de căldură radioizotopice. Simulările au inclus conducția, presupunând absența mișcării fluidului intern sau a

radiației, utilizând modelul de suprafață-la-suprafață (S2S) potrivit pentru mediul de vid din spațiu.

Figura 6-3 pare să ilustreze o distribuție a temperaturii pe suprafața unui RTG cu o sursă de căldură mai centralizată, așa cum indică regiunile roșii și galbene care reprezintă temperaturi mai ridicate. Gradientul de temperatură este neted, cu temperaturile cele mai ridicate concentrate în centru și scăzând treptat spre margini. Uniformitatea punctelor fierbinți sugerează că sursa de căldură a RTG distribuie eficient căldura pe suprafața centrală. Ampenaj, evidențiate în albastru închis, sunt la o temperatură mult mai redusă, în conformitate cu funcția lor de a disipa căldura de la unitatea centrală.

În Figura 6-4, distribuția temperaturii este mai puțin uniformă. Sunt vizibile puncte fierbinți distincte, care probabil reprezintă surse de căldură localizate sau zone unde conducția căldurii este mai eficientă. Gradientul de la centru la margini este mai abrupt, cu o scădere mai pronunțată a temperaturii indicată de gama largă de culori de la roșu în centru la albastru închis la vârfurile aletelor. Acest lucru ar putea sugera un efect de încălzire mai localizat sau o răspândire a căldurii mai puțin eficientă în regiunea centrală a RTG.

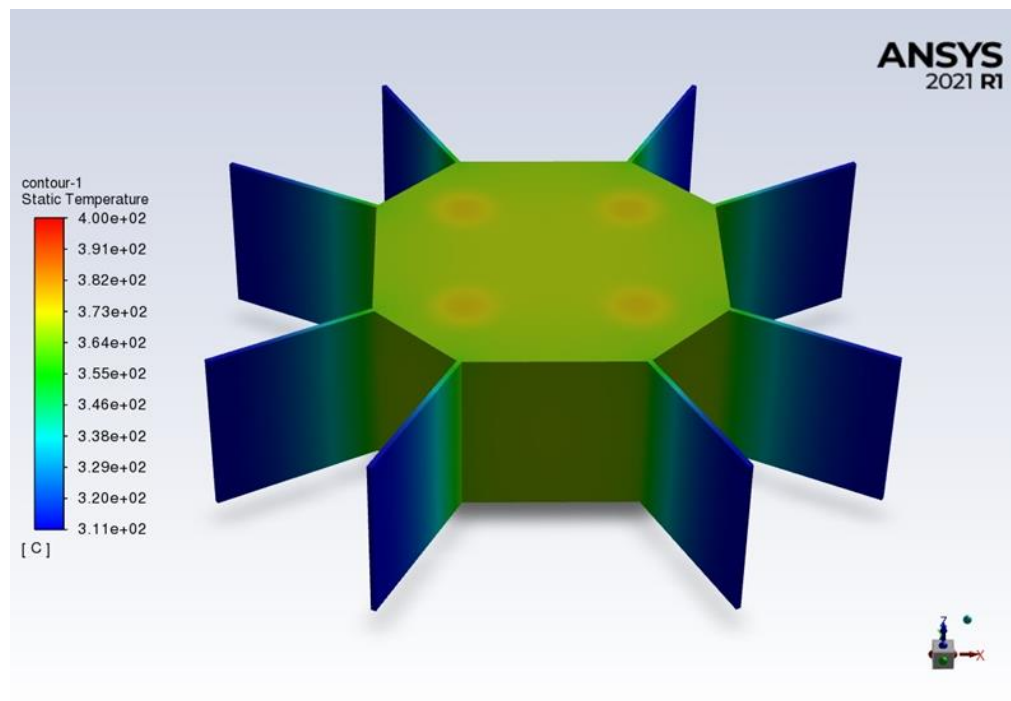


Figure 6-3 Heat transfer in the rectangular geometry

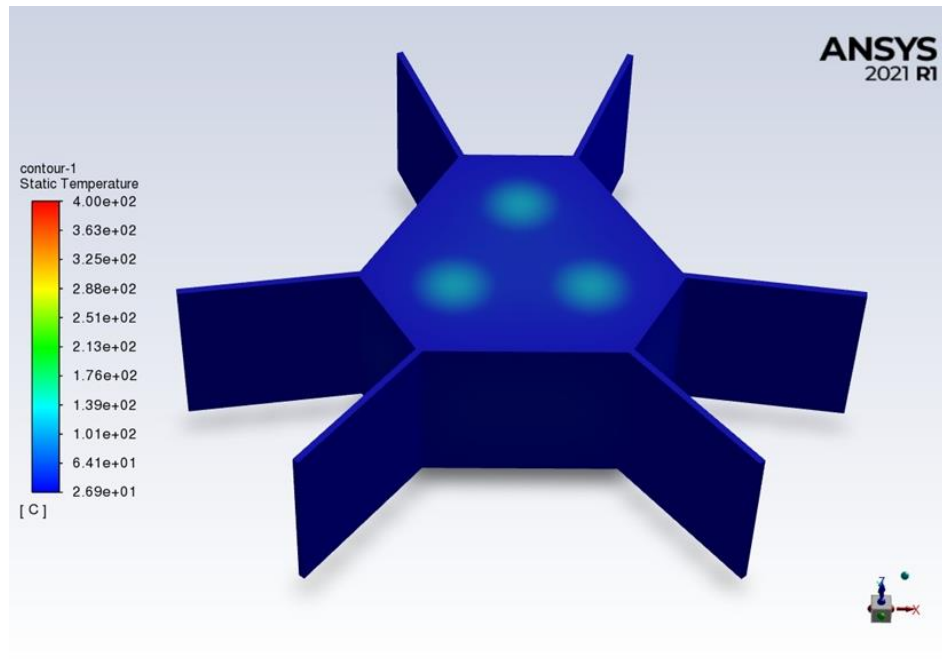


Figure 6-4 Heat transfer in the triangular geometry

Geometria rectangulară demonstrează o distribuție uniformă a căldurii, îmbunătățind performanța constantă a modulului termoelectric, în timp ce geometria triunghiulară arată puncte fierbinți localizate și o răspândire neuniformă a căldurii, care ar putea împiedica conversia termoelectrică eficientă.

Prin urmare, pe baza graficelor de distribuție a temperaturii și a conturului de transfer de căldură, designul RTG rectangular poate oferi un profil de temperatură mai favorabil pentru generarea termoelectrică. Totuși, această evaluare se bazează doar pe distribuția temperaturii și transferul de căldură. Nu ia în considerare alți factori precum proprietățile materialelor în modelele reale și configurația exactă a elementelor termoelectrice. Pentru o comparație mai definitivă, o analiză care include acești parametri suplimentari poate fi investigată într-un model experimental în viitor.

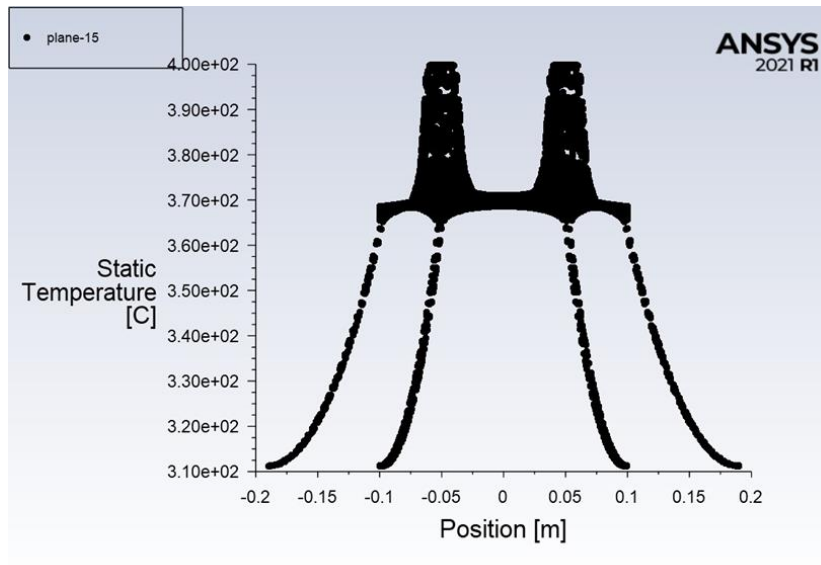


Figure 6-5 The temperature distribution in rectangular geometry

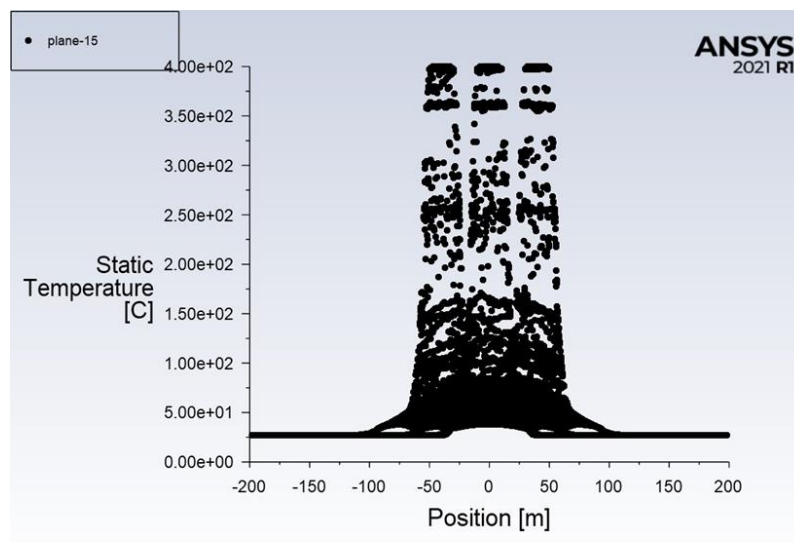


Figure 6-6 The temperature distribution in triangular geometry

6.4 CONCLUZII

Acest capitol utilizează simulări ANSYS pentru a compara efectele transferului de căldură ale designurilor geometrice triunghiulare și rectangulare asupra modulelor termoelectrice în Generatoarele Termoelectrice cu Radioizotopi (RTGs). Rezultatele indică faptul că designul rectangular îmbunătățește eficiența conversiei termoelectrice printr-o distribuție mai uniformă a temperaturii și un transfer de căldură mai bun către spațiu, datorită aletelor suplimentare. Acest design permite, de asemenea, includerea

unei celule suplimentare de radioizotopi, ceea ce ar putea crește puterea de ieșire a RTG-ului și eficiența generală a sistemului. Simulările sugerează că optimizarea geometriei RTG-urilor ar putea îmbunătăți semnificativ performanța acestora.

7 STUDIU DE CAZ – AMERICIU-241

Calcularea radioizotopului: În explorarea surselor de energie eficiente și durabile pentru Generatoarele Termoelectrice cu Radioizotopi (RTGs), Americiu-241 (Am-241) s-a dovedit a fi un candidat remarcabil. Cu o perioadă de înjumătățire lungă de 432,2 ani și o generare robustă de căldură din dezintegrarea alfa, Am-241 oferă o alternativă viabilă la Plutoniu-238, utilizat în mod obișnuit. Acest capitol discută utilizarea Am-241 în RTGs, subliniind importanța calculului precis al căldurii de dezintegrare pentru îmbunătățirea eficienței sistemului și a producției electrice în proiectarea RTG-urilor.

7.1 DE CE ESTE SELECTAT AM-241 CA SURSĂ DE CĂLDURĂ

Americiu-241 (Am-241) oferă mai multe atribute care îl fac o alegere atractivă pentru Generatoarele Termoelectrice cu Radioizotopi (RTGs), în special în aplicațiile care necesită surse de energie pe termen lung și fiabile. Iată motivele cheie pentru care Am-241 este considerat potrivit pentru RTGs:

- Jumătate lungă de viață
- Ieșire stabilă de putere
- Siguranță și manipulare
- Disponibilitate
- Compatibilitate cu materialele termoelectrice
- Aspecte de mediu și reglementare
- Provocări și considerații

7.2 PROPRIETĂȚI FIZICO-CHIMICE ALE AM241

7.2.1 PROPRIETĂȚI FIZICE

- Număr atomic: 95
- Număr de masă: 241

- Densitate: Aproximativ 13,67 g/cm³, foarte dens, reflectând caracteristicile sale din seria actinidelor.
- Punct de topire: Aproximativ 1173 K (900°C sau 1652°F), destul de ridicat și indicativ pentru natura sa metalică.
- Punct de fierbere: Este estimat să fie în jur de 2011 K (1738°C sau 3150°F), deși măsurarea precisă este dificilă din cauza radioactivității sale.
- Perioadă de înjumătățire: 432,2 ani, furnizând o emisie relativ stabilă de particule alfa pe perioade îndelungate.
- Mod de dezintegrare: În principal, experimentează dezintegrarea alfa în Neptuniu-237 (Np-237).
- Capacitatea termică specifică: Datele specifice pot varia, dar similar cu alte actinide, Am-241 are o capacitate termică relativ scăzută, afectând modul în care stochează și transferă energia termică.

7.2.2 PROPRIETĂȚI CHIMICE

- Stări de oxidare: Americiul poate prezenta mai multe stări de oxidare, cea mai stabilă și comună în compuși fiind +3, similar cu alte actinide.
- Reactivitate chimică: Am-241 reacționează cu oxigenul pentru a forma oxid de americium (III) (Am₂O₃) în condiții normale. Poate forma, de asemenea, compuși cu alte nemetale și acizi, demonstrând comportamentul tipic al actinidelor.
- Solubilitate: În forma sa metalică, Am-241 nu este solubil în apă. Cu toate acestea, compușii săi, cum ar fi oxizii și halogenurii, au solubilitate variabilă în diferite solvenți.

7.2.3 STRUCTURA CRISTALINĂ

La temperatura camerei: Americiul-241 cristalizează într-o structură dublă hexagonală compactă (DHCP) la temperatura camerei, ceea ce este comun în rândul actinidelor. Această structură este denumită faza α . Figura 1 arată structura DHCP și diferența acesteia cu HCP.

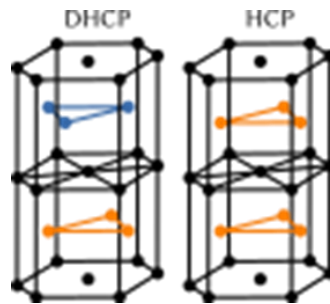


Figure 7-1. The DHCP and HCP structure

În diferite condiții: Am-241 suferă mai multe tranziții de fază la încălzire. De exemplu, la temperaturi mai ridicate, trece la o structură cubică centrată pe față (fcc), cunoscută sub numele de faza β .

7.2.4 CALCULUL MASEI DE RADIOIZOTOP

Calcularea cu precizie a masei americiului-241 (Am-241) într-un generator termoelectric cu radioizotopi (RTG) este crucială pentru optimizarea puterii termice și pentru asigurarea funcționării eficiente a modulelor termoelectrice. Acest calcul precis al masei este esențial pentru obținerea gradientului de temperatură necesar și a energiei termice suficiente, care afectează tensiunea de ieșire și longevitatea RTG. De asemenea, afectează în mod semnificativ fezabilitatea, costul și siguranța RTG, făcându-l un factor cheie în proiectarea soluțiilor de energie autonomă pe termen lung. Puterea termică specifică a lui Am-242 de aproximativ 0,114 wați pe gram, alături de considerentele eficienței termoelectrice și diferențele de temperatură dorite, ghidează acest calcul esențial.

Iată o schiță a pașilor pentru a determina masa Am-241:

Determinați puterea termică necesară: cantitatea de putere termică necesară depinde de eficiența materialului termoelectric utilizat în RTG și de diferența de temperatură dorită. Aceasta poate fi calculată din relația dintre fluxul de căldură Q diferența de temperatură (ΔT) și rezistența termică (R) a sistemului, ca ecuație:

$$Q = \frac{\Delta T}{R}$$

Cu toate acestea, deoarece cantitatea reală de R din Am241 și eficiența exactă a materialelor termoelectrice depind de geometriile și mulți parametri din modelul actual, am presupus un scenariu ideal pentru a calcula puterea minimă necesară.

1. Estimarea Puterii de Ieșire Necesare: Puterea electrică efectivă necesară poate fi determinată pe baza cerințelor aplicației, dar aici ne concentrăm pe aspectul termic al unei diferențe de temperatură.
2. Utilizarea Puterii Specifice a Am-241: Puterea specifică a Am-241 este de 0.114 W/g. Această valoare este crucială pentru calcularea cantității totale de Am-241 necesare pentru a obține puterea termică dorită.
3. Calcularea Masei de Am-241: În cele din urmă, masa radioizotopului este calculată folosind puterea specifică a Am-241 și puterea termică dorită.

Puterea specifică de căldură măsoară câtă putere termică (în wați) este produsă per gram de material radioactiv datorită dezintegrării sale. Formula utilizată pentru calcul este dată de ecuația:

$$\text{Mass of Am-241 needed} = \frac{\text{Desired Thermal Power Output (W)}}{\text{Specific Power of Am-241 (W/g)}}$$

Având în vedere că puterea specifică a lui Am241 este: 0,114 W/g

Și deoarece dorim să estimăm masa necesară pentru 1 W. Deci, puterea termică dorită este:

$$\text{Mass of Am-241 needed} = \frac{1\text{W}}{0.114\text{W/g}} \approx 8.77\text{g}$$

Aproximativ 8,77 Kg pentru a genera o putere termică de ieșire de 100 W.

7.2.5 CALCULUL TEMPERATURII DE SUPRAFAȚĂ A RADIOIZOTOPULUI

În „Capitolul de simulare”, radioizotopul este caracterizat ca o formă cilindrică cu un diametru de 2 cm și o înălțime de 3 cm. În condițiile de temperatură ambientală a camerei și ținând cont de orice pierderi datorate conducției căldurii, calculul pentru determinarea temperaturii de suprafață a radioizotopului decurge după cum urmează:

Se ia în considerare transferul de căldură în primul rând prin radiații datorate aplicării în spațiu.

$$\text{Suprafața (A) a unui cilindru este dată de } A = 2\pi r(h + r)$$

Unde:

- r este raza, iar h este înălțimea cilindrului.

- Raza (r) = 1 cm = 0.01 m (since the diameter is 2 cm)
- Înălțimea (h) = 3 cm = 0.03 m
- Temperatura Ambientală (T_{ambient}) = 25 = 298 K
- Puterea generată ($P_{\text{generated}}$) = 1 W
- Stefan-Boltzmann constant (σ) = $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
- Emissivitate ~ 1

$$P_{\text{generated}} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{surface}}^4 - T_{\text{ambient}}^4)$$

Pentru a calcula temperatura suprafeței, ecuația Stefan-Boltzmann trebuie rezolvată pentru T_{surface} :

$$T_{\text{surface}} = \left(\frac{P_{\text{generated}}}{A \cdot \epsilon \cdot \sigma} + T_{\text{ambient}}^4 \right)^{\frac{1}{4}}$$

Prin rezolvarea ecuației, temperatura suprafeței de 8,77 grame de Americiu-241 (Am-241), format într-un cilindru cu o înălțime de 3 cm și un diametru de 2 cm într-un mediu cu o temperatură ambientală de 25°C, este aproximativ 349,4 K. sau în Celsius, aceasta este aproximativ 76,3°C.

7.2.6 COMPARAȚIE AM-241 CU PU-238 ȘI PO-210

- Puterea Specifică: Po-210 > Pu-238 > Am-241. Poloniu-210 are o putere specifică semnificativ mai mare datorită timpului său de înjumătățire scurt și dezintegrării rapide.
- Timpul de Înjumătățire: Am-241 > Pu-238 > Po-210. Americiu-241 are cel mai lung timp de înjumătățire, făcând ca dezintegrările și puterea sa să fie mai graduale pe o perioadă mai lungă, în timp ce Poloniu-210 are un timp de înjumătățire foarte scurt, rezultând o dezintegrare rapidă și o putere specifică mare, dar pentru o durată mult mai scurtă.
- Emisia Principală: Toate cele trei izotopi sunt emițători semnificativi de particule alfa, ceea ce înseamnă că emit în principal particule alfa în timpul dezintegrării.
- Masa Atomică și Produsele de Dezintegrare: Fiecare izotop se dezintegrează într-un produs fiică diferit prin emisia unei particule alfa. Alegerea între acești izotopi pentru aplicații specifice, cum ar fi generatoarele termoelectrice cu radioizotopi (RTGs), depinde de factori precum puterea necesară, durata misiunii și

considerațiile de siguranță, inclusiv protecția împotriva radiațiilor și toxicitatea materialului.

7.3 CONCLUZII

În concluzie, deși aspectele teoretice ale utilizării radioizotopilor în RTG-uri oferă perspective asupra potențialului pentru Am-241 și alte materiale, considerațiile practice precum eficiența, costul, siguranța și conformitatea reglementară sunt cruciale în determinarea fezabilității și optimizării acestora pentru aplicații specifice. Alegerea radioizotopului, designul sistemului RTG și cerințele specifice aplicației influențează colectiv practicitatea și logica utilizării surselor de energie bazate pe radioizotopi.

Această evaluare a evidențiat adecvarea Am-241 pe baza timpului său de înjumătățire, puterii specifice și ratei de dezintegrare gestionabile, comparativ cu imperativul pentru calculuri precise ale masei izotopului și ale dezintegrării termice. Alegerea Am-241, condusă de producția sa energetică previzibilă și stabilă pe perioade îndelungate, exemplifică o alegere strategică pentru generarea de energie pe termen lung în medii izolate sau inaccesibile. Această alegere reflectă un echilibru armonizat între calculele teoretice și considerațiile practice, orientate către aplicații, marcând un pas esențial către valorificarea dezintegrării nucleare pentru soluții energetice durabile.

8 CONCLUZII GENERALE

Trecerea către surse alternative și sustenabile de energie a devenit necesară datorită creșterii cererii globale și disponibilității limitate a rezervelor de combustibili fosili. Mai mult, sistemele tradiționale de energie emit o cantitate semnificativă de gaze cu efect de seră, necesitând tranziția către alternative de energie curată, fără carbon. În plus, furnizarea surselor de energie în zone izolate implică costuri inițiale ridicate, inclusiv costuri de transfer.

În plus, nevoia de surse de energie (fără soare) crește zilnic pentru cercetările spațiale. O metodă eficientă pentru a realiza această transformare este utilizarea generatorilor termoelectrice.

Generatoarele termoelectrice, cum ar fi generatoarele termoelectrice cu radioizotopi (RTG-uri), sunt tehnologii avansate care reduc deșeurile și promovează producția sustenabilă de energie. RTG-urile au demonstrat indispensabilitatea lor în scenarii în care sursele tradiționale de energie nu sunt fezabile. Aceste generatoare exploatează căldura de descompunere a materialelor radioizotopice pentru a furniza o sursă de energie fiabilă, vitală în setări îndepărtate și greu accesibile, cum ar fi aplicațiile spațiale.

Deși tehnologia termoelectrică, în special sub forma RTG-urilor, este un element crucial al planurilor viitoare de energie, acest sistem este întotdeauna asociat cu provocări precum eficiența redusă și indisponibilitatea radioizotopurilor adecvate.

Această cercetare a oferit soluții pentru fiecare provocare asociată cu RTG-urile, demonstrând aplicabilitatea lor în multe scenarii. Câteva puncte cheie includ:

- Material termoelectric: Deoarece materialele termoelectrice cresc semnificativ eficiența sistemului RTG, această cercetare a sintetizat două tipuri de generatoare termoelectrice folosind nanomateriale: NaCoO_2 și BaCaCoO . Aceste materiale prezintă o eficiență ridicată în intervalul de temperatură de lucru. În plus, aplicarea unui câmp magnetic și hidratarea cilindrului termoelectric au crescut semnificativ coeficientul Seebeck și figura de merit (doi criterii cruciale pentru îmbunătățirea eficienței sistemului).

- Proiectarea geometriei corecte pentru optimizarea transferului de căldură utilizând ANSYS: Este crucial să se convertească cât mai multă căldură posibil de la sursa de căldură la convertorul termoelectric. Această studiu a utilizat ANSYS Fluent și SolidWorks pentru a proiecta o geometrie rectangulară pentru RTG. Rezultatele au arătat că acest design permite includerea unui cilindru suplimentar de combustibil în fiecare panou, crește transferul de căldură și asigură o distribuție uniformă a temperaturii în aripioarele RTG-ului.
- Radioizotop: În RTG-urile tipice, radioizotopul folosit este Plutoniul-238, care este dificil de procurat și necesită niveluri ridicate de siguranță. După examinarea mai multor izotopi și luând în considerare priorități precum siguranța, jumătatea de viață mare, disponibilitatea și costul inițial redus, Americiul-241 a fost selectat ca izotop și sursă de căldură. Americiul-241, un emițător de particule alfa, prezintă probleme minime de siguranță. Jumătatea sa de viață lungă de 432 de ani permite RTG-ului să funcționeze cel puțin 30 până la 40 de ani fără a fi necesară reîncărcarea combustibilului. În plus, Americiul-241 are un cost inițial mai scăzut și este mai ușor de procurat decât alte radioizotopi