



UPPSALA UNIVERSITET

Inlämningsuppgift 2

Kärnkraft - Teknik och System

1FA410

Oskar Andersson

6 november 2023

Sammanfattning

yao

Innehåll

1	Introduktion	4
2	Teori	4
2.1	Multiplikationsfaktor och reaktivitet	4
2.1.1	Prompt kriticitet	5
2.2	Effekt	5
2.3	Void	6
2.4	Temperatur	7
3	Metod	7
3.1	Initialtillstånd och konstanter	7
3.2	Beräkningar	8
4	Resultat	9
5	Diskussion	9
6	Slutsats	9
	Referenser	10
	Appendix	11

1 Introduktion

I en konstruerad händelse sker en olycka i en reaktor vilket leder till att en eller flera styrstavar åker ut ur härden. Detta bidrar till att det sker en kraftig ökning av effekt, void, bränsletemperatur och multiplikationsfaktor, något som kan skada reaktorn och i sin tur orsaka ytterligare olyckor. För att bättre förstå systemets beteende undersöks de första sekunderna av händelseförloppet. Med hjälp av Euler framåt-metoden kan ett resultat med god approximering uppskattas.

2 Teori

2.1 Multiplikationsfaktor och reaktivitet

En insikt om multiplikationsfaktorn (k_{eff}) och reaktiviteten (ρ) i en reaktor är centralt för att förstå konsekvenserna av händelseförloppet. I sin enklaste ekvation (1) kan multiplikationsfaktorn ses som kvoten mellan antalet neutroner i den nuvarande generationen och antalet neutroner i den tidigare generationen.

$$k_{eff} = \frac{\text{Antal neutroner i denna generation}}{\text{Antal neutroner i tidigare generation}} \quad (1)$$

Ett värde < 1 för multiplikations faktorn betyder att neutronantalet minskar från generation till generation medans ett värde > 1 betyder att antalet neutroner växer. När $k = 1$ så ligger neutronerna på ett konstant antal.

och reaktivitet ges av ekvation 2:

$$\rho = \frac{1 - k_{eff}}{k_{eff}} \quad (2)$$

I scenariot vi studerar så åker en eller fler styrstavar snabbt ut ur härden vilket ger upphov till flera efterföljder. Den mest centrala orsaken till varför det blir en förändring av initialtillstånden efter händelsen är att multiplikationsfaktorn (k_{eff}) växer markant. I tidigare inlämningsuppgift (Oskar Andersson 2023) har vi studerat femfaktorformeln som är given av ekvation 3

$$k_{eff} = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \cdot P \quad (3)$$

där η är den termiska fissionsfaktorn, ϵ är den snabba fissionsfaktorn, p är resonanspassagefaktorn, f är den termiska utnyttjandefaktorn och P är icke-läckagefaktorn. (KSU 2015)

När 'X' antal styrstavar åker ut ur härden kommer det till en början att höja den termiska utnyttjandefaktorn vilket leder till en ökning av multiplikationsfaktorn (Oskar Andersson 2023). En förhöjd multiplikationsfaktor kommer i sin tur ge upphov till en mängd av

reaktioner som igen kommer att påverka multiplikationsfaktorn. I detta arbete kommer detta att studeras vidare.

Då fokus inte ligger på femfaktorformeln i detta arbete kommer inga fullständiga beräkningar göras uttrycket. En förenklad version av beräkningen av multiplikationsfaktorn efter 4. (Branger u. å.[a])

$$\frac{dk}{dt} = \frac{dk}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{dk}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

Här antas förändringen av multiplikationsfaktorn beroende på voiden ($dk/d\alpha$) och förändringen av multiplikationsfaktorn beroende av bränsletemperaturen (dk/dT) vara konstanta. Uttrycken dT/dt och $d\alpha/dt$ redovisas i senare kapitel.

2.1.1 Prompt kriticitet

En reaktor kallas prompt kritisk när dess multiplikationsfaktor kan hållas lika med eller över ett med endast prompta neutroner. Vid tillfällen som detta ökar multiplikationsfaktorn hastigt och vi tar då endast den prompta neutronens livslängd i beaktande som sägs vara $0.0001s$. Anledningen till att vi inte tar hänsyn till fördröjda neutroner är på grund av den snabba förändringen av reaktordynamiken när reaktorn är prompt kritisk. Fördröjda neutroners livslängd är ca $13s$ blir därför inte lika intressanta.

2.2 Effekt

När fissila ämnen klyvs i härden frigörs stora mängder energi som över tid är en reaktors effekt. Antalet fissila kärnor som fissioneras är direkt kopplat till hur många fria neutroner som existerar i härden. Ekvation 5 redovisar hur effekten (P) påverkas av att fria neutroner ökar. (KSU 2015)

$$P = \Phi \cdot \sigma_{f,bransle} \cdot E_{fission} \cdot N_{bransle} \quad (5)$$

Där Φ är neutronflödet, $\sigma_{f,bransle}$ är det mikroskopiska tvärsnittet för de fissila kärnorna i härden, $E_{fission}$ är energin frigjord per klyvning och $N_{bransle}$ är antalet fissila kärnor i härden.

En kraftig ökning av effekt kan leda till att reaktorn skadas eller allvarigare olycka. För att beräkna hastigheten av tillväxten av effekt används ekvation 6 som är dubblingstiden av effekten

$$t_{dubbling} = \frac{l \cdot \ln(2)}{\ln(k_{eff})} \quad (6)$$

där l är medellivslängden för neutroner i härden. (ibid.)

I det imaginära scenario som har målats upp är $k_{eff} = 1.02$ och $\Lambda = \Lambda_{prompt} = 0.0001s$. Detta ger en dubblingstid på $0.0035s$ om reaktiviteten behålls oförändrad.

Effekt över tid ges av ekvation 7 som beror på startvärdet för effekten (P_0), reaktiviteten (ρ) och medellivslängden (Λ). (KSU 2015)

$$P(t) = P_0 \cdot e^{\frac{\rho \cdot t}{\Lambda}} \quad (7)$$

Derivatan av P beroende av t ger ekvation 8.

$$\frac{dP}{dt} = P(t) \cdot e^{\frac{\rho(t)}{\Lambda}} \quad (8)$$

2.3 Void

Kvoten mellan ånga och vatten av moderatoren i en hård kallas void och ges av ekvation 9.

$$\alpha = \frac{V_{\text{ånga}}}{V_{\text{moderator}}} \quad (9)$$

I en reaktor är moderatorns uppgift att bromsa ned snabba neutroner till termiska neutroner, vilket är essentiellt för att de ska kunna användas till klyvning av Uran-235 och andra fissila kärnor. Kokarvattenreaktorer har vatten som moderator och där är det vattnets molekyler (framförallt väteatomerna) som de snabba neutronerna kolliderar med vilket överger delar av deras kinetiska energi tills att de blir termiska. Då ånga har en lägre densitet av vattenmolekyler blir modereringen sämre när reaktorn går mot en högre void. (ibid.)

En förändring av voiden åstadkommas på två sätt: justering av huvudcirkulationsflödet och reaktorns termiska effekt. (ibid.) I det undersökta scenariot antas huvudcirkulationsflödet vara kontinuerligt då det inte finns en chans att ändra flödet under den korta tidsrymden. Därmed är reaktorns termiska effekt enbart av intresse. Ekvation 10 (Branger u. å.[a]) beskriver förändringen av void över tid i reaktorn

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{P_{\text{värmeöverföring}} - P_{\text{mod,kyl}}}{\Delta h_{\text{ånga}} \cdot \rho_{\text{ånga}} \cdot V_{\text{mod}}} \quad (10)$$

där $P_{\text{mod,kyl}}$ är den effekt som förs bort av moderatoren och antas vara konstant under händelseförloppet, $\Delta h_{\text{ånga}}$ är det specifika ångbildningsvärmets vid 70 bar och $\rho_{\text{ånga}}$ är densiteten för mättad ånga vid 70 bar. $P_{\text{värmeöverföring}}$ ges av ekvation 11 (ibid.).

$$P_{\text{värmeöverföring}} = U \cdot T_{\text{kapsling}} \quad (11)$$

T_{kapsling} representerar kapslingstemperaturen och värmeöverföringskoefficienten beräknas genom ekvation 12 (ibid.).

$$U = U_{H_2O} \cdot (1 - \alpha) \quad (12)$$

U_{H_2O} är värmeföringskoefficienten för vatten som är multiplicerad med $(1 - \alpha)$ där α är voiden. Ånga har en förmåga att leda värme men i detta fall görs ett val att försumma den då dess värmeöverföringskoefficient är så pass liten att den inte har tillräckligt stor inverkan på slutresultatet.

Slutligen ges V_{mod} av ekvation 13, där $V_{bränsle}$ är bränslets volym och $V_{förhållande}$ är kvoten mellan moderatorns och bränslets volym.

$$V_{mod} = V_{bränsle} \cdot V_{förhållande} \quad (13)$$

2.4 Temperatur

Fouriers värmeledningslag lyder enligt ekvation 14. (Sjöstrand u. å.)

$$Q = m_{bränsle} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (14)$$

Derivatn ger ekvation 15.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = m_{bränsle} \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (15)$$

Då $\dot{Q} = P(t) - P_{mod,kyl}$, erhålls 16 som är den sista ekvationen.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P(t) - P_{mod,kyl}}{m_{bränsle} c_p} \quad (16)$$

I ekvationen är $m_{bränsle}$ massan för bränslet och c_p är den specifika värmekapaciteten för urandioxid. (ibid.)

Om temperaturen blir för hög i hårdan kan det leda till en härdsmlta, en mycket seriös olycka. Smälttemperaturen för urandioxid ligger vid ungefär 3050 K. Det är dock viktigt att poängtera att den beräknade temperaturen inte är homogen inuti bränslet. Bränslefördelningen ser ut på det sättet att värmen är som högst centralt i bränslet och avtar mot dess kanter. För att allt bränsle ska smälta krävs alltså att bränsletemperaturen är högre än smältpunkten av urandioxid. Dessvärre kommer bränsleskador att ske om temperaturen blir tillräckligt hög. Hänsyn till kapslingstemperaturen måste även tas då kapslingsmaterialet har en lägre smältpunkt än urandioxid som sägs vara 1500 K. Om kapslingsmaterialet smälter betyder det allvarliga bränsleskador. (Sjöstrand 2023)

3 Metod

3.1 Initialtillstånd och konstanter

I uppgiften är initialvärden givna (Branger u.å.[b]), vilket har stor påverkan på hur händelseförloppet ser ut. Om andra scenarion är av intresse går dessa att variera för

att vidare studera systemets beteende. I tabell 1 står initialvärden listade för det utredda fallet.

Storhet	Värde	Enhet
Längdeffekt, P	150	W/cm
Void, α	25	%
Bränsletemperatur, $T_{bränsle}$	1273	K
Kaplingstemperatur, $T_{kapling}$	573	K
Multiplikationsfaktor, k	1.02	-

Tabell 1 – Initialvärden för det studerade fallet

Konstanter för systemet som ges av tabell 2 är givna från instruktioner (Branger u. å.[b]).

Storhet	Värde	Enhet
Volymförhållande ($Moderator/Bränsle$)	2.8	-
Densitet (UO_2), ρ	10.5	g/cm^3
Stavdiameter, D	1	cm
Värmekapacitet, c_p	0.4	kJ/kgK
Värmeövergångstal(H_2O), U	14.3	$W/cm/K$
Moderatorkylning, P	150	W/cm
neutronmedellivslängd, Λ	0.0001	s
$dk/d\alpha$	-100	$pcm/\% \alpha$
dk/dT	-4	pcm/K^{-1}

Tabell 2 – Konstanter som används i beräkningar av systemets beteende.

Ytterligare konstanter som är nödvändiga för att undersöka systemet som är tagna från andra källor ges av tabell 3.

Storhet	Värde	Enhet
Stavhöjd, h	1	cm
Densitet ($\dot{a}nga$), ρ	$36.52E - 6$ (efunda u. å.)	kg/cm^3
Specifika ångbildningsvärmes, Δh	1506 (Sjöstrand u. å.)	kJ/kg

Tabell 3 – Ytterligare konstanter som används i beräkningar av systemets beteende.
Stavhöjden är vald till 1 cm för att erhålla effekten i W/cm .

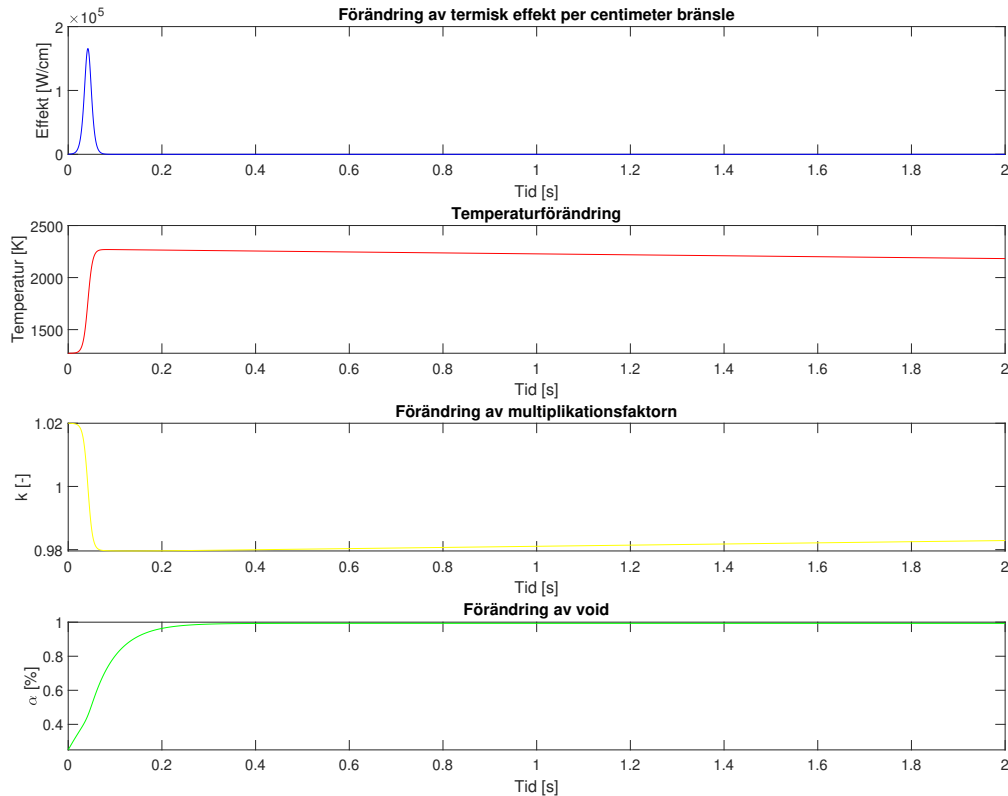
3.2 Beräkningar

Beräkningar av händelseförloppet använder Euler framåt för att approximera lösningar till differentialekvationerna presenterade i tidigare kapitel. Metoden börjar med att tillsätta initialvärden till ekvationerna som sedan används för att approximera nästkommande steg. Desto kortare steglängd desto högre noggrannhet. En steglängd på 0.0001s har valts för att överensstämja med medellivslängden för prompta neutroner. Denna process upprepas över en tid vilket ger en god approximering av systemets beteende.

4 Resultat

Figure

En grafisk representering av resultatet ges av 1, som visar hur parametrarna av intresse förändras över tid.



Figur 1 – Grafiska resultat över förändring av effekt, bränsletemperatur, multiplikationsfaktor och void.

Effekten ökar kraftigt till ca $1.6E5 \text{ W/cm}$ under en kort tidsperiod och sjunker lika snabbt därpå till originalvärdet. Under samma tidsförlopp ökar bränsletemperaturen till ca 2300 K . Men tillskillnad från effekten så minskar temperaturen betydligt långsammare. Multiplikationsfaktorn sänks från 1.02 till ungefär 0.98 under samma tidsrymd och växer sedan sakta. Voiden är den parameter som dröjer längst till att nå en extrempunkt som i detta fall är väldigt nära 1. Den är även den parameter som förändras minst över den resterande studerade tiden.

5 Diskussion

6 Slutsats

Referenser

- Branger, Erik (u. å.[a]). "Inlämningsuppgift 2".
- (u. å.[b]). "Instruktioner till inlämningsuppgift 2".
- efunda (u. å.). *Saturated Steam Table*. hämtad 2023/11/06. URL: https://www.efunda.com/materials/water/steamtable_sat.cfm.
- KSU (2015). "Reaktornfysik". Kraftindustrins grundutbildningspaket.
- Oskar Andersson, Ebba Wargh (2023). "Inlämningsuppgift 1".
- Sjöstrand, Henrik (2023). "Muntlig kommunikation".
- (u. å.). "F08 Värmebalanser ånga void".

Appendix

Kod: <https://github.com/BDBandito/foreveryone1/blob/main/inlupp2karnkraftV2.asv>