

## Inlämningsuppgift 3: Hållbara energi- och transportsystem – Grupp 4 Kärnkraft

**INTRODUKTION:** Världen står inför enorma utmaningar när det gäller klimatförändringarna och energisäkerhet till följd av ökande efterfrågan och sinande oljereserver. I den här uppgiften ska ni fördjupa er i en koldioxidneutral energikälla genom att göra beräkningar och diskutera kring olika aspekter. De tekniker som respektive smågrupp kommer att fördjupa sig i för den här uppgiften är vindturbiner, solceller, bioenergi och kärnkraft.

Uppgiften syftar till att bidra till följande lärandemål för kursen:

- Att kunna beskriva vilka klimatneutrala energitillförselsystem som står till buds idag för att lösa framtidens energiefterfrågan och klimatmål och redogöra för storleksordningarna på dess potentialer
- Att kunna argumentera för de viktigaste för- och nackdelarna med olika klimatneutrala tekniker och deras kritiska begränsningar.
- Att kunna beskriva hur kostnaden för energi påverkas av valet av energikälla.

**LITTERATUR:** Läs kurslitteraturen som hör ihop med er teknik extra noggrant och leta även gärna efter egen information. Var dock noga med att ange källor för den information ni använder.

**OMFATTNING:** Tidsmässigt motsvarar denna inlämningsuppgift en arbetsinsats på cirka 20 timmar/person (0,75 hp).

**INLÄMNING:** Inlämning av svarsrapport ska ske via kurshemsidans funktion för inlämningsuppgifter senast tisdag 2017-05-02 kl 20:00 (dvs, några timmar efter fördjupningstillfället för denna inlämningsuppgift).

**BEDÖMNINGSGRUNDER FÖR GODKÄNT & POÄNGSÄTTNING:** För att bli godkänd på denna inlämningsuppgift krävs att man besvarat samtliga delfrågor och att man får minst 10 poäng (av maximalt 20) på uppgiften. Poängsättning görs utifrån följande kriterier:

- *Fullständighet och genomförande enligt instruktion* – är hela frågan korrekt besvarad? Är relevanta uppgifter inkluderade?
- *Beräkningar*, är beräkningarna korrekta och noggrant redovisade? Används rätt enheter? Redogörs det för vilka antaganden som gjorts?
- *Resonemang, argumentation och redogörelse* – är de argument som används relevanta, av vikt, och adekvata? Är resonemanget transparent och lätt att följa? Är språket klart och texten begriplig? Finns rena missuppfattningar eller felaktiga påståenden?
- *Förankring i och förhållningssätt till källor* – används ett kritiskt och självständigt förhållningssätt till den förmedlade informationen? Görs relevanta hänvisningar till litteratur och/eller föreläsningar? Visar studenten att den tillgodogjort sig innehållet i kursen?

## Kärnkraft

Det finns i dagsläget (december 2013) totalt 434 kärnreaktorer i drift runt om i världen och 72 nya kärnreaktorer är under uppbyggnad. Under senare tid har dock kostnaderna för kärnkraftsutbyggnad ökat och olyckan i Fukushima år 2011 har fått många länder att omvärdera sina kärnkraftsprogram för att satsa på fossila eller förnybara energikällor. Kärnkraften står nu vid ett vägskäl och det är svårt att förutsäga om den kommer att utgöra en betydande energikälla i framtiden eller minska i omfattning.

Som representanter för kärnkraftsindustrin har ni blivit kontaktade av presidenten för ett litet europeiskt land som överväger att ställa om sitt energisystem från kol och olja till fossilfri energi. Presidenten är ganska väl insatt i de olika teknologierna så det handlar om att ge en balanserad bild av för- och nackdelar och vässa argumenten. Inte minst kommer presidenten att vara intresserad av kostnaderna för er teknologi (jämfört med priset för fossil energi), hur stor yta som behövs för att tillgodose landets energibehov, samt vilken kritik medborgare i landet kan tänkas rikta mot er teknologi. Ni kommer också att behöva sätta er in i era konkurrenters teknologier (bioenergi, solenergi och vindkraft) för att kunna ifrågasätta felaktiga påståenden och peka på risker.

Under ett möte med presidenten (förddjupningstillfället) kommer ni ges möjlighet att presentera argumenten för er teknologi i cirka 10 minuter, därefter har presidenten och representanterna för de andra teknologierna möjlighet att ställa frågor i 5 minuter. Efter alla industrier har presenterat fortsätter mötet med en frågestund och därefter fattar presidenten beslut kring vilken teknologi (eller vilken mix av teknologier) han/hon kommer att investera i.

### 1. Fysisk potential - reserver och resurser

Om kärnkraft ska spela en betydande roll för att minska koldioxidutsläppen i energisystemet i framtiden krävs en mycket kraftig utbyggnad. Dagens nivå på 9 EJel/år motsvarar cirka 12 % av den globala elproduktionen (och cirka 4,5 % av den globala energitillförseln i primärenergitermer). Då uran är en ändlig resurs (s.k. lagerresurs) kommer tillgångarna förr eller senare att ta slut. Det är emellertid inte enbart *resursen* (den uppskattade totala mängden uran i världens berggrunder) som bestämmer hur mycket uran som kan brytas, utan *reserven*. *Reserven* är den nu kända mängden uran som är ekonomiskt och tekniskt möjlig att bryta. Reserven är alltså en delmängd av den totala resursen.

- a) Hur många år skulle uranet räcka vid en kraftig utbyggnad av kärnkraften, om man använde hela de globala reserverna? Hur länge skulle det räcka om man använde hela de globala resurserna?

Antag att elen produceras i konventionella lättvattenreaktorer i öppen bränslecykel.

Redogör för era beräkningar. **(2p)**

Använd följande värden:

- En global elproduktion från kärnkraft på 100 EJel/år. (total elanvändning kan komma att öka från dagens 78 EJ till så mycket som 200 EJ år 2050, och kärnkraftens andel av den globala elproduktionen skulle alltså i detta fall öka till ca 50 %).
- Uran förekommer i två isotoper, klyvbar uran-235 (0.7% av total) och uran-238 (99.3% av total) som brukar betecknas som en icke klyvbar isotop.

- Elproduktionen per mängd uran-235 i en lättvattenreaktor i öppen bränslecykel antas vara ca  $29 \text{ GJ}_{\text{el}}/\text{g U-235}$ .
- De globala *reserverna* av uran (uranhaltiga mineraler som kan utvinnas till ett pris under 130 \$/kg) uppskattas till totalt 3.9 Tg.
- De totala *resurserna* av uran på land utöver reserverna uppskattas till totalt ca 17 Tg.

I en bridreaktor med snabba neutroner (Fast Breeder Reactor) omvandlas U-238 till plutonium-239, som är klyvbart med långsamma neutroner. Energin i reaktorn alstras sedan genom klyvning av detta plutonium, vilket kan ske i samma reaktor.

- b)** Hur länge skulle urantillgångarna räcka om man istället använde det i bridreaktorer? Vad finns det för risker med att använda briderreaktorer? **(2p)**

Antag samma framtida elproduktion från kärnkraft som i deluppgift a. Antag att elproduktionen per mängd uran-238 i ett bridreaktorsystem är ca  $14 \text{ GJ}_{\text{el}}/\text{g U-238}$ . Redogör för era beräkningar och sammanställ värdena från deluppgift a och b i en tabell enligt nedan.

Räcker-år-värden (för  $100 \text{ EJ}_{\text{el}}/\text{år}$ ):

|                  | Lättvattenreaktor<br>(öppen bränslecykel) | Bridreaktor<br>(sluten bränsle-cykel) |
|------------------|---|---------------------------------------|
| Reserver:        |   |                                       |
| Totala resurser: |   |                                       |

## 2. Slutförvar

Det uttjänade kärnbränslet (uran från konventionella kärnkraftreaktorer) måste isoleras från människor och natur i minst 100 000 år och frågan om slutförvar är en viktig del i beräkningen av hur attraktiv kärnkraften är i förhållande till andra energikällor. Än så länge finns inga deponier som kan hantera det högaktiva bränslet, men i Sverige har man kommit förhållandevis långt.

- Hur länge kommer det nu planerade slutförvaret i Forsmark räcka om vi i Sverige fortsätter använda kärnkraft i samma utsträckning som idag (årlig produktion av ca 70 TWh)? **(1p)**
- Hur många ton avfall skulle genereras globalt per år, om vi vill producera  $100 \text{ EJ}_{\text{el}}/\text{år}$  från kärnkraft? **(1p)**

Använd följande värden för beräkningen:

- Varje reaktor har en effekt på  $1000 \text{ MW}_{\text{el}}$  (öppen bränslecykel) och en kapacitetsfaktor på 85% (dvs, reaktorn körs i medel över ett år på full effekt 85% av tiden).
- Cirka 20 ton avfall produceras per år och reaktor (utöver detta tillkommer lågaktivt avfall).
- SKB:s (svensk kärnbränslehantering) anläggning i Forsmark kommer att ha kapacitet att ta hand om 12.000 ton använt kärnbränsle när det är fyllt utbyggt omkring år 2070. (Det planeras att tas i drift redan i mitten av 2030-talet.)

- c) Det är under en väldigt lång tid som uttjänat kärnbränsle måste hållas isolerat. Vilka risker ser ni med att vi nu förbinder oss till att förvara farligt avfall isolerat under så lång tid? **(2p)**

### 3. Risken för kärnkraftsolyckor

- a) Ett sätt att bestämma hur farlig en viss teknik för elproduktion är, är att beräkna hur många dödsfall som inträffar per producerad TWh el. Det är svårt att uppskatta dödsantalet vid kärnkraftsolyckor då en stor del av dem beror på cancer, som inte uppkommer förrän år efter olyckan. Olika organisationer och forskningsgrupper har gjort väldigt olika bedömningar. I den här uppgiften får ni två olika uppskattningar av dödstalet vid Tjernobyl och Fukushima. Vad blir dödstalet, orsakat av olyckor, per producerad TWh el för kärnkraft utifrån de olika uppskattningarna? Är detta lågt eller högt om man jämför med andra energikällor (se tabell nedan)? Varför tror ni att uppskattningarna är så olika? Finns det andra typer av dödsfall relaterade till kärnkraft som kanske också borde ingå i beräkningen? Vilka? **(3p)**

Använd följande värden för beräkningen:

- Total producerad el från kärnkraft i världen mellan 1966 och 2011: 72244 TWh. (Källa: BP, statistical energy review)

#### Uppskattning 1

- 4000 dödsfall som följd av Tjernobyl (enligt en uppskattning av WHO, <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html>).
- Inga dödsfall vid Fukushima.

#### Uppskattning 2

- 93 000 dödsfall som en följd av Tjernobyl (enligt en uppskattning av Greenpeace: <http://www.greenpeace.org/international/en/news/features/chernobyl-deaths-180406/>).
- 1300 dödsfall som följd av Fukushima (Källa: Bloomberg-artikel 2012-07-17, "Fukushima Radiation May Cause 1,300 Cancer Deaths, Study Finds").

| Energikälla | Dödsantal per TWh |
|-------------|-------------------|
| Kol         | 170               |
| Olja        | 36                |
| Gas         | 4                 |
| Bioenergi   | 24                |
| Sol         | 0.44              |
| Vindkraft   | 0.15              |
| Vattenkraft | 1.4               |

Källa: <http://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/>

- b) Vid Fukushimaolyckan skapades en säkerhetszon omkring verket på 20 km. Uppskatta hur många personer som skulle påverkas om en liknande olycka skulle inträffa vid Ringhals i Sverige och en säkerhetszon av samma mått skulle skapas. (Tips: Använd google-maps för att hitta Ringhals. Lagg sedan in en cirkel, med radie 20 km, runt verket och se vilka kommuner/städer som hamnar innanför cirkeln). Vid Fukushimaolyckan uppmanades svenskar som var inom 80 km från kärnkraftverket att evakuera. Gör en ny uppskattning av hur många som skulle påverkas av en sådan säkerhetszon kring Ringhals. Redogör för era beräkningar och antaganden. **(1p)**

#### 4. Ekonomisk potential

Produktionskostnaden för el från ett kärnkraftverk beror huvudsakligen på fem faktorer:

- den årliga elproduktionen (beror på kraftverkets installerade effekt och kapacitetsfaktorn)
- Investeringskostnaden
- Kostnaden för drift och underhåll
- Finansieringskostnaden (räntan)
- Den ekonomiska livslängden på kärnkraftverket

Den generella formeln för att räkna ut vad det kostar att producera el från ett kärnkraftverk (per kWh) är

$$\text{Kostnad} = \frac{IK * AF + D\&U}{8760 \frac{h}{\text{år}} * KF} + \frac{KKS}{8760 \frac{h}{\text{år}} * KF * \eta} + \frac{BK}{\eta} + SF$$

*IK*: Investeringskostnad, [SEK/kW]

*D&U*: Drift och Underhåll [SEK/kW/år]

*AF*: Annuitetsfaktorn [år<sup>-1</sup>]. Andelen av investeringskostnaden som man behöver betala varje år för att täcka ränta och amortering på lånet. Formeln för annuitetsfaktorn är

$$AF = \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^T}}$$

*r*: ränta på lånet

*T*: kraftverkets ekonomiska livslängd, uttryckt i år

*KF*: kraftverkets kapacitetsfaktor, hur stor andel av tiden på full effekt som kraftverkets elproduktion motsvarar

*KKS*: kärnkraftsskatt uttryckt i SEK/(kW termisk effekt, år)

*SF*: slutförvaringsavgift i SEK/kWh

*BK*: bränslekostnad, uttryckt i SEK/ kWh<sub>bränsle</sub> (termisk energi)

*η*: verkningsgrad (mängden elektrisk energi som kraftverket generera per energienhet i bränslet)

Kärnkraft har traditionellt byggts av statligt kontrollerade företag eller på kontrollerade marknader där ett visst pris kan garanteras över en längre tidsperiod. Med sådana förutsättningar blir det lättare att "räkna hem" den stora investering det innebär att bygga ett kärnkraftverk, då kostnaden enkelt kan överföras till konsumenterna genom att justera elpriset. Under de senaste årtiondena har många länder gått över till avreglerade elmarknader där priset bestäms av utbud och efterfrågan. Det gör att investeringar i kärnkraft har blivit mer osäkra då el-priserna snabbt kan förändras med nya teknologier. Detta är en förklaring till varför investeringarna har minskat under senare tid. Med högre elpriser (på grund av ökad efterfrågan och införande av koldioxidskatter) är det dock möjligt att kärnkraften återigen anses vara en god investering. Samtidigt har kostnaden för byggnation av kärnkraftverk ökat under senare tid. I den här uppgiften ska ni uppskatta kostnaden för kärnkraft.

- a) Använd den generella formeln, presenterad ovan, för att räkna ut vad det kostar att producera el från ett kärnkraftverk (per kWh). Eftersom uppskattningen av vad kostnaden är för att investera i ett kärnkraftverk varierar skall ni beräkna den generella kostanden för två fall. I det första fallet ska ni räkna med en investeringskostnad på 60 000 SEK/kW, (denna uppskattning är ett medelvärde från Wall Street och oberoende analyser). I det andra fallet skall ni använda en investeringskostnad på 28 000 SEK/kW (detta är ett medelvärde från kärnkraftsbolagens uppskattningar). Övriga uppgifter är samma för de båda fallen. Livslängden på ett kärnkraftverk är cirka 60 år och räntan antas vara 7,5%. Kärnkraftverket behöver stängas av ibland för service och underhåll och vi kan anta att det "endast" genererar el 85 % av tiden under ett år (kraftverkets kapacitetsfaktor). Bränslekostnad kan sättas till 3 öre/kWh<sub>bränsle</sub> (ungefär 1 öre vardera för uranbrytning, anrikning och bränsletillverkning). Verkningsgraden i ett kärnkraftverk är ungefär 30 %. Räkna även med en kostnad på 1000 SEK/kW/år för drift och underhåll. (Lägg till den årliga kostnaden för drift och underhåll till den årliga avbetalningen på investeringskostnaden.) Till kostnaderna för kärnkraft tillkommer också slutförvaringsavgift på 2 öre/kWh och en kärnkraftsskatt på 122 SEK/kW (termisk effekt) per år. Jämför med vad du betalar för din el hemma. (Eller kolla upp priset hos något av energibolagen.) **(2p)**
- b) Hur högt skulle priset på utsläpp av koldioxid behöva vara för att kärnkraft skulle bli billigare än kolkraft, i fallet med den högre investeringskostnaden? (Svara i SEK/ton CO<sub>2</sub>.) Bränslet kol har ett C-innehåll av 25 gC/MJ. Vid förbränning bildar varje C-atom en CO<sub>2</sub>-molekyl. Antag att kapacitetsfaktorn för kolkraftverket är 80%, verkningsgraden från termisk till elektrisk energi är 40%, investeringskostnaden är 20 100 SEK/kW och bränslekostnaden är 28 SEK/GJ. Räkna också med en kostnad på 615 SEK/kW/år för drift och underhåll. Antag åter igen en ränta på 7,5% och en ekonomisk livslängd på kolkraftverket på 40 år. **(3p)**

### **5. Sammanfattning – för och nackdelar av de olika konkurrerande teknologierna**

Sammanfatta kort (gärna i en tabell) det ni anser vara de viktigaste för och nackdelarna med både er teknologi (kärnkraft) samt dem som era konkurrenter representerar (bioenergi, solenergi och vindkraft). **(3p)**

*Rekommenderade länkar för den nyfikne:*

Energimyndigheten 2010 - Kärnkraften nu och i framtiden

<https://energimyndigheten.a-w2m.se/FolderContents.mvc/Download?ResourceId=2465>

**INFÖR FÖRDJUPNINGSTILLFÄLLET:** Förbered en kort muntlig presentation av er teknik (10 minuter) för presidenten och era konkurrenter. I presentationen skall ni berätta vilken framtida potential ni tror att er teknik har. Basera detta på vilka resurser som krävs och tillgången på dem, kostnader för elproduktion med er teknik, risker med tekniken, samt andra fördelar och nackdelar som ni tycker är viktiga. Meningen är inte att ni skall redovisa era beräkningar under presentationen, men ni får gärna visa resultat från dem för att stärka era argument.