

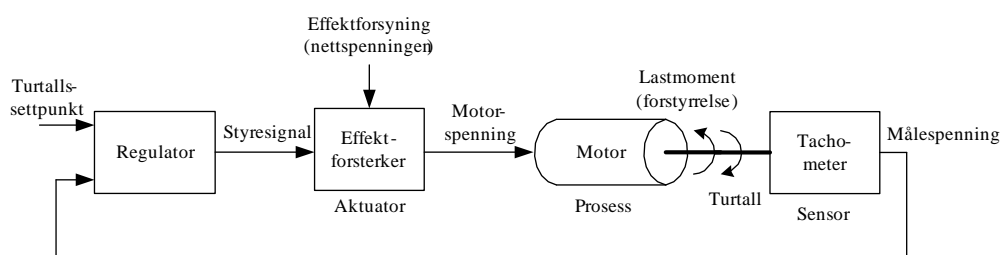
Høgskolen i Telemark. Emneansvarlig: Finn Aakre Haugen (finn.haugen@hit.no).

## Løsningsforslag til sluttprøven i emne IA3112 Automatiseringsteknikk

Sluttprøvens dato: 15. desember 2014. Varighet 5 timer. Vekt i sluttkarakteren: 100%. Hjelpemidler: Ingen.

---

1. (5%) Figur 1 viser turtallsreguleringssystemet.



Figur 1: Turtallsreguleringssystem for motor

2. (10%) Se figur 2. Bokstaven C er benyttet for konsentrasjon.

3. (5%)<sup>1</sup>

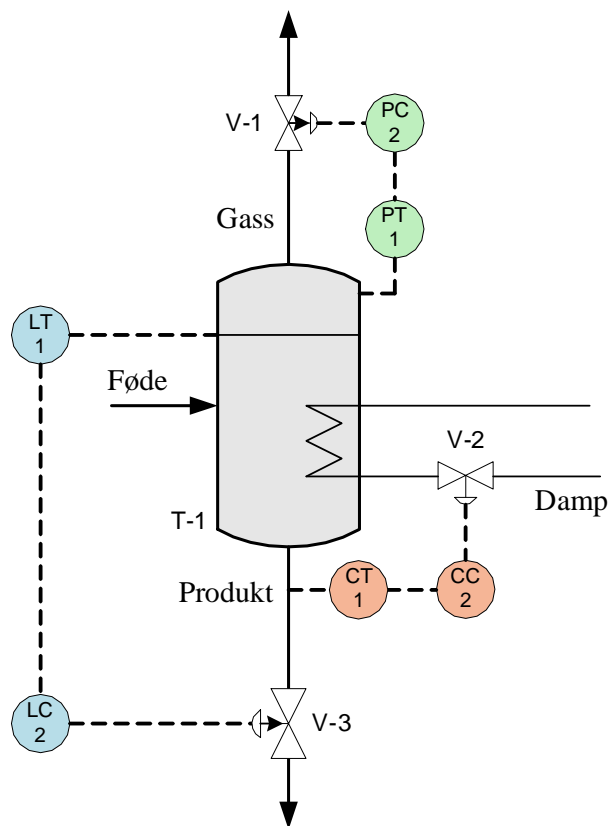
- Nullpunkt: 15 °C.
- Måleomfang: 45 °C – 15 °C = 30 K.
- Nedre prosessverdi: 15 °C, men svaret –200 °C aksepteres også, jf. fotnote 1.
- Øvre prosessverdi: 45 °C, men svaret 500 °C aksepteres også, jf. fotnote 1.

4. (5%) Ventilen skal kunne levere  $Q = 15 \text{ L/min} + 50\%$  av  $15 \text{ L/min} = 22,5 \text{ L/min}$ . Olje har relativ tetthet ca. 0,85. Vi tar utgangspunkt i ventillikningen oppgitt i oppgavens vedlegg:

$$Q = K_v \sqrt{\frac{p_v}{G}} \quad (1)$$

---

<sup>1</sup>Oppgaven er identisk med oppgave 4.20 i læreboka. Men dessverre er det en feil i løsningen på oppgaven i læreboka.  $-200 \text{ °C}$  er der angitt som nedre prosessverdi, og  $500 \text{ °C}$  er angitt som øvre prosessverdi. Riktige svar er hhv.  $15 \text{ °C}$  og  $45 \text{ °C}$ . Pga. feilene i læreboka godtas både  $-200 \text{ °C}$  og  $15 \text{ °C}$  som nedre prosessverdi og både  $500 \text{ °C}$  og  $45 \text{ °C}$  som øvre prosessverdi som svar i sluttprøven.



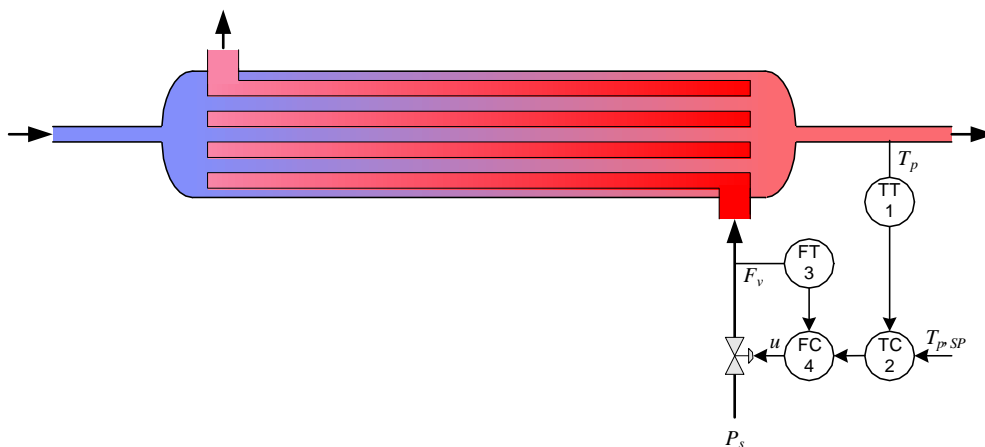
Figur 2: Teknisk flytskjema for fordamperen

Løsning mht. ventilkonstanten gir

$$\underline{\underline{K_v}} = \frac{Q}{\sqrt{\frac{p_v}{G}}} = \frac{22,5 \text{ [L/min]}}{\sqrt{\frac{0,5 \text{ bar}}{0,85}}} \quad (2)$$

$$= \frac{22,5 \text{ [0,001 m}^3\text{/(h/60)]}}{\sqrt{\frac{0,5 \text{ bar}}{0,85}}} = \underline{\underline{1,76 \text{ m}^3\text{/h}}} \quad (3)$$

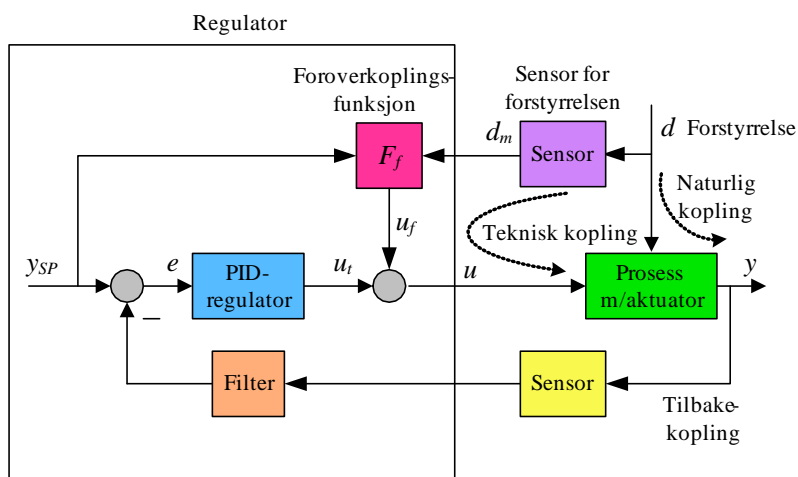
5. (5%) Figur 3 viser et teknisk flytskjema av en temperaturregulert varmeveksler der en kald prosesstrøm varmes opp vha. varmtvann. Reguleringsstrukturen er kaskaderegulering der primærsøyfen er en temperaturreguleringssøyfe for temperaturen av prosesstrømmen ut av varmeveksleren. Sekundærsøyfen er en strømningsreguleringssøyfe for for varmtvannsstrømmen som kompenserer for variasjoner i trykket som driver varmtvannsstrømmen, slik at denne strømmen varierer lite, hvilket



Figur 3: Kaskadereguleringssystem for varmeveksler

bidrar til at temperaturen ut av varmeveksleren varierer lite (fra sitt settpunkt).

- (5%) Figur 4 viser strukturen av et reguleringssystem med foroverkopling og tilbakekopling. Foroverkoplingen utgjør en



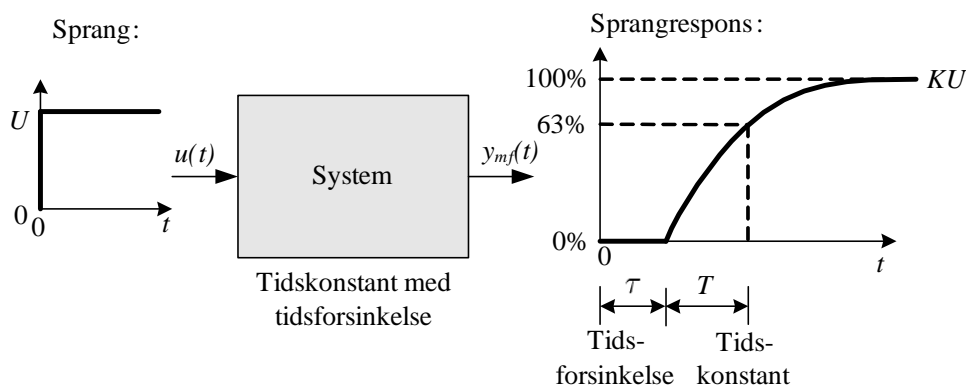
Figur 4: Reguleringssystem med foroverkopling og tilbakekopling.

(teknisk) kopling fra en måling av forstyrrelsen som motvirker den naturlige koplingen fra forstyrrelsen til prosessutgangen slik at nettovirkningen som forstyrrelsen har på prosessutgangen, blir null (ideelt sett). Foroverkoplingen implementerer også en direkte kopling fra settpunktet til pådraget, hvilket gir presis settpunktsfølging. Pga.

uunngåelig modellunøyaktighet (eller modellfeil) kan foroverkoplingen i praksis ikke beregne det perfekte pådraget, hvilket medfører at det oppstår et reguleringsavvik.

Tilbakekoplingen vil justere pådraget på basis av dette avviket og dermed kunne redusere avviket, og gi null avvik under statiske forhold.

7. (5%) Se figur 5.



Figur 5: Prinsipiell sprangrespons for prosess med “tidskonstant med tidsforsinkelse”-dynamikk med angivelse av  $K$ ,  $T$  og  $\tau$ .

8. (5%) Fra vedlegg A i eksamensoppgaven: Tidsdiskret PI-regulatorfunksjon:

$$u(t_k) = u_{\text{man}} + u_p(t_k) + u_i(t_k) \quad (4)$$

der P-leddet er

$$u_p(t_k) = K_p e(t_k) \quad (5)$$

og I-leddet er

$$u_i(t_k) = u_i(t_{k-1}) + \frac{K_p T_s}{T_i} e(t_k) \quad (6)$$

$u_i$  gitt ved (6) inngår som et additivt ledd i det totale pådraget  $u$  som er gitt ved (4). Anta at  $K_p$ ,  $T_i$  og  $T_s$  er positive. Anta at reguleringsavviket  $e$  til å begynne med er forskjellig fra null, la oss si positiv. Fra (6) ser vi at dette medfører at  $u_i$  øker fra ett tidsskritt til det neste. Når  $u_i$  øker, vil også det totale pådraget  $u$  øke.

Pådragsøkningen medfører at prosessmålingen øker og dermed avtar reguleringsavviket. Pådragsøkningen vil foregå helt til avviket er blitt null, mao. helt til  $e$  er null i (6).

Kort sagt: Integralleddet endrer pådraget helt til avviket er blitt null (stasjonært).

9. (5%) PI-regulatoren stilles inn under antakelse av at prosessdynamikken er “integrator med tidsforsinkelse”. Tidsforsinkelsen er  $\tau = 1$  min. Integralforsterkningen blir

$$K_i = \frac{10 \text{ \%/min}}{20 \text{ \%}} = 0,5 \text{ min}^{-1} \quad (7)$$

Skogestads formler gir

$$\underline{\underline{K_p}} = \frac{1}{2K_i\tau} = \frac{1}{2 \cdot 0,5 \text{ min}^{-1} \cdot 1 \text{ min}} = \underline{\underline{1}} \quad (8)$$

$$\underline{\underline{T_i}} = 4\tau = 4 \cdot 1 \text{ min} = \underline{\underline{4 \text{ min}}} \quad (9)$$

10. (5%) I Ziegler-Nichols’ svingemetode stilles en P-regulator inn slik:

$$K_p = 0,5K_{p_u} \quad (10)$$

der  $K_{p_u}$  er kritisk forsterkning, som er den verdien av  $K_p$  som gjør at reguleringssystemet blir marginalt stabilt. Forsterkningmarginen er den faktoren,  $\Delta K_u$ , som  $K_p$  multipliseres med for å gi marginal stabilitet. Dette gir

$$\underline{\underline{GM}} = \Delta K_u = \frac{K_{p_u}}{K_p} = \frac{K_{p_u}}{0,5K_{p_u}} = \underline{\underline{2}} \quad (11)$$

11. (5%) Vi kan ta utgangspunkt i følgende Skogestad-formler:

$$K_p = \frac{1}{2K_i\tau} \quad (12)$$

$$T_i = 4\tau \quad (13)$$

der  $\tau$  er prosessens tidsforsinkelse. Fra formlene ser vi at en økning av  $\tau$  med en faktor på 3, tilsier at  $K_p$  skal reduseres med en faktor på 3:

$$\underline{\underline{K_p}} = \frac{1,5}{3} = \underline{\underline{0,5}} \quad (14)$$

og at  $T_i$  skal økes med en faktor på 3:

$$\underline{\underline{T_i}} = 3 \cdot 8 \text{ min} = \underline{\underline{24 \text{ min}}} \quad (15)$$

Med den opprinnelige PI-innstillingen ville reguleringssystemets stabilitet blir forverret pga. økningen av tidsforsinkelsen, og i verste fall hadde reguleringssystemet blitt ustabilt.

12. (5%) Vi kan finne ny PI-innstilling vha. repetert Ziegler-Nichols' metode der  $K_{p0} = 2$  og  $P_{u0} = 12$  min. Forbedret PI-innstilling blir

$$\underline{\underline{K_p}} = 0,45 \cdot K_{p0} = 0,45 \cdot 2 = \underline{\underline{0,9}} \quad (16)$$

$$\underline{\underline{T_i}} = \frac{P_u}{1,2} = \frac{12 \text{ min}}{1,2} = \underline{\underline{10 \text{ min}}} \quad (17)$$

(Den opprinnelige  $T_i$ -verdien på 6 min brukes ikke i beregningen av de nye parameterverdiene.)

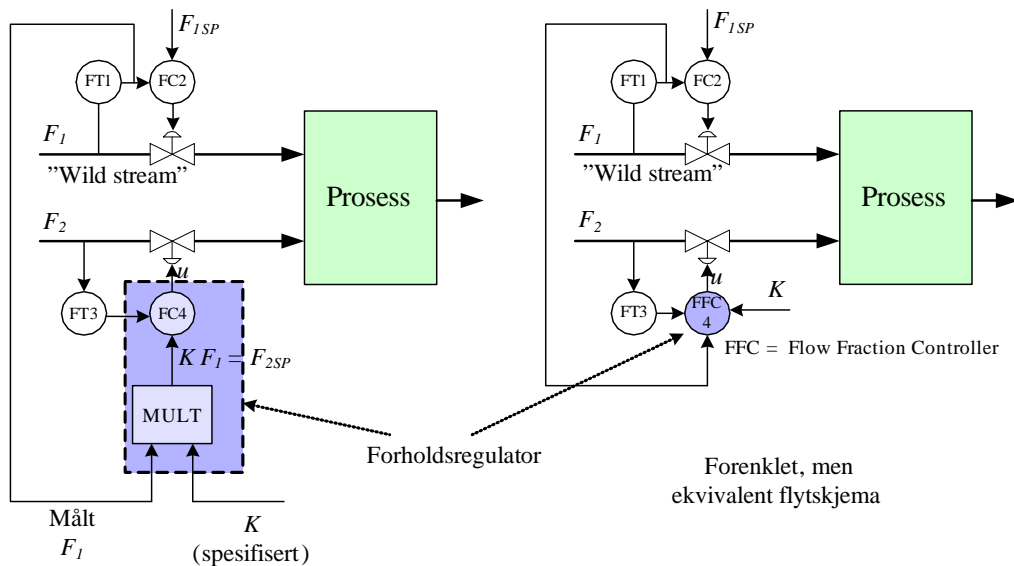
13. (5%) Filterformlene er

$$y_{mf}(t_k) = (1 - a)y_{mf}(t_{k-1}) + ay_m(t_k) \quad (18)$$

$$a = \frac{T_s}{T_f + T_s} \quad (19)$$

Fra (18) ser vi at støy i målesignalet  $y_m$  blir vektlagt mindre dersom  $a$  reduseres, hvilket kan oppnås ved å øke  $T_f$ .

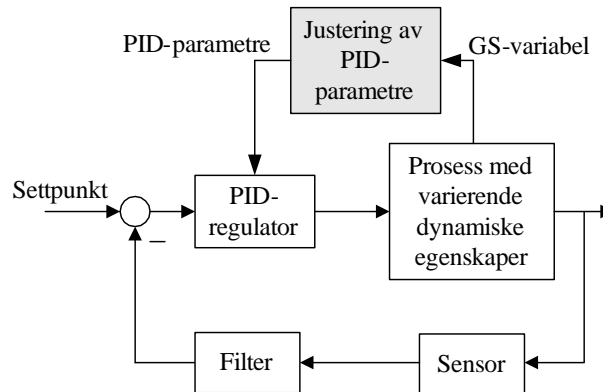
14. (5%) Figur 6 viser et teknisk flytskjema for et forholdsreguleringssystem i to versjoner (begge versjonene aksepteres som korrekt svar). Reguleringsystemet får strømmen  $F_2$  til å følge



Figur 6: Forholdsregulering

settpunktet  $F_{2sp} = K \cdot F_1$  der  $F_1$  er målingen av strømmen  $F_1$  og  $K$  er et spesifisert forholdstall.

15. (10%) Prinsippet for PID-regulering med gain scheduling er at PID-innstillingen justeres (automatisk) som en funksjon av en prosessmåling, kalt GS-variabelen, som antas å representere prosessens dynamiske egenskaper til enhver tid, se figur 7. Blokken

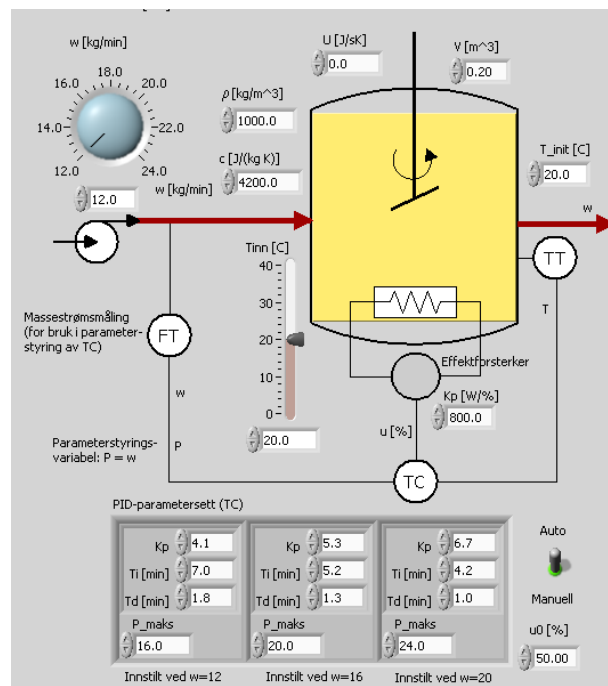


Figur 7:

“Justering av PID-parametre” i figuren kan utføre interpolering i en tabell som inneholder et sett av brukbare PID-parameterverdier for forskjellige verdier av GS-variabelen. Disse PID-parametrene vil være funnet med en eller annen egnet PID-innstillingsmetode, f.eks. Skogestads metode, eller med en auto-tuner.

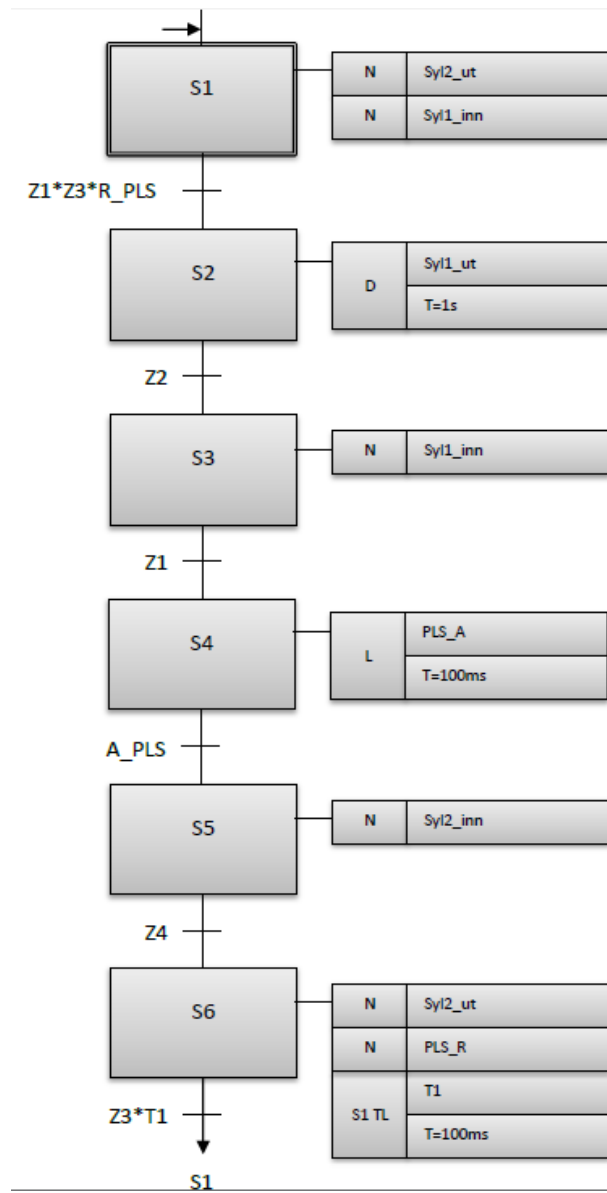
Et eksempel på en anvendelse er temperaturregulering av en væsketank der væskestrømmen gjennom tanken varierer, se figur 8. Det kan vises at når væskestrømmen varierer, endres prosessens dynamiske egenskaper, f.eks. prosessforsterkningen. Målt væskestrøm kan derfor brukes som GS-variabel for justering av temperaturregulatorens innstilling.

16. (15%) Se figur 9.



Figur 8:





Figur 9: SFC