



# Høgskolen i Telemark

Avdeling for teknologiske fag

## **SLUTTPRØVE**

EMNE: EK3114 Automatisering og vannkraftregulering.

EMNEANSVARLIG: Finn Aakre Haugen. Tlf. 97019215. Epost: finn.haugen@hit.no.

<b>KLASSE(R):</b>	<b>DATO:</b> 2.12.2015	<b>Tid: Kl. 9-14 (5 timer)</b>	
<b>Sluttprøven består av følgende:</b>	<b>Antall sider: 15</b> (medregnet denne forsiden)	<b>Antall oppgaver: 11</b>	<b>Antall vedlegg: 1</b> (formelliste og tabeller med bokstavkoder)
<b>Tillatte hjelpemidler:</b> Ingen (heller ikke kalkulator)	<b>Lærerne i emnet besøker ikke eksamenslokalene med mindre emneansvarlig eller eksamensansvarlig finner det nødvendig. Studenter kan ikke kalle på noen av lærerne for å få hjelp til å tolke oppgavene.</b>		
<b>KANDIDATEN MÅ SELV KONTROLLERE AT OPPGAVESETTET ER FULLSTENDIG.</b>			
Vennligst bruk kulepenn (dersom oppgaven ikke er PC-basert).			
Eksamensresultatene blir offentliggjort fortløpende på Studentweb.			

## Sluttprøve i emne EK3114 Automatisering og vannkraftregulering

Emneansvarlig: Finn Aakre Haugen, dosent.

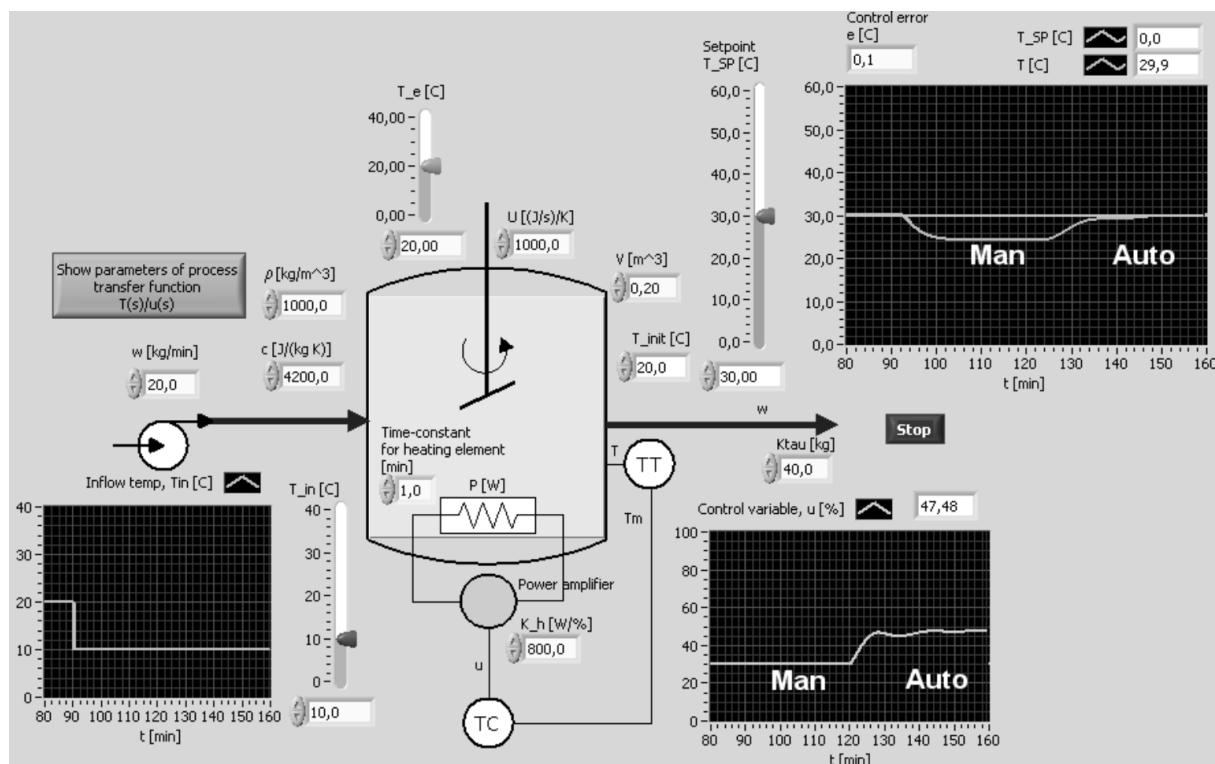
Sluttprøvens dato: 2.12 2015. Varighet 5 timer. Vekt i sluttkarakteren: 100%.

Hjelpemidler: Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler. Kalkulator er ikke tillatt (hvis du ikke kan regne ut sluttsvaret for hånd, er det godt nok som svar at du setter opp uttrykket som kan beregnes med kalkulator dersom du hadde hatt en). Vedlagt oppgavesettet er en formelliste og tabeller med bokstavkoder (du må selv finne aktuell informasjon der).

Hvis du mener at det mangler forutsetninger for å løse en oppgave, skal du selv definere passende forutsetninger og angi dem i besvarelsen, slik at du allikevel kan løse oppgaven.

### Oppgave 1 (10%)

Figur 1 viser et temperaturreguleringssystem for en vanntank og simulerte responser for systemet.



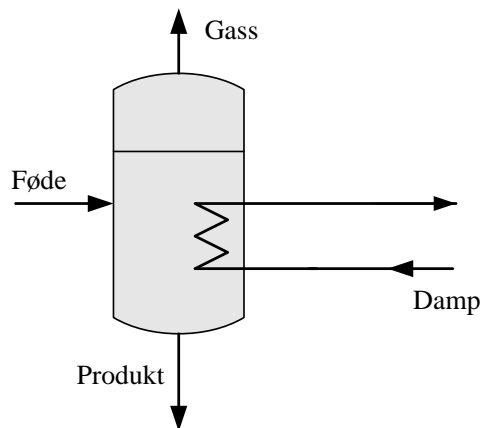
Figur 1

- (7%) Anta at regulatoren står i automatisk modus. Forklar kort hvordan (det automatiske) temperaturreguleringssystemet virker.
- (3%) Vurdert ut fra simuleringen, hvilken regulatormodus - automatisk eller manuell - fungerer best? Begrunn svaret.

### Oppgave 2 (10%)

Figur 2 viser en fordamper der ønsket produkt framkommer ved fordampning i tanken. Fordamperen skal reguleres med tre reguleringsløyfer:

- En nivåreguleringsløyfe: Sensoren måler væsknivået i tanken. Aktuatoren er en FC-ventil (Fail Closed) i produktrørledningen.
- En trykkreguleringsløyfe: Sensoren måler trykket i gassen i tanken. Aktuatoren er en FO-ventil (Fail Open) i gassrørledningen.
- En konsentrasjonssløyfe: Sensoren måler konsentrasjonen av en bestemt produktkomponent i væskefasen i tanken. Aktuatoren er en ventil som styrer dampstrømmen inn til fordamperen.



Figur 2

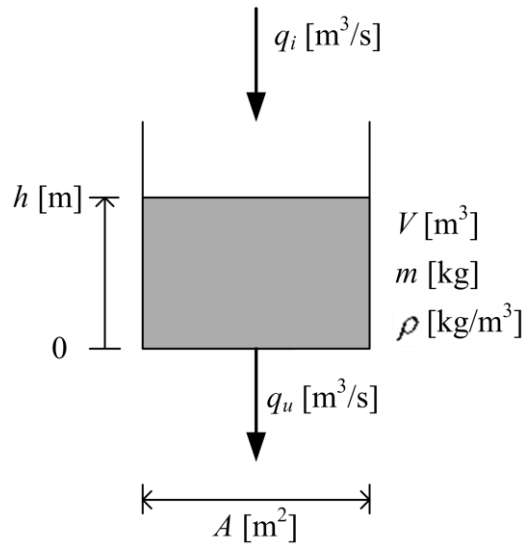
Tegn et teknisk flytskjema for reguleringsystemet for fordamperen. Bruk parallell nummerering. Signalene er elektriske. Ikke tegn inn piler på signalledningene. Settpunktene skal ikke tegnes inn som eksplisitte signaler. Angi bokstav- og tallkoder for fordamperen og ventilene. Konsentrasjon er ikke definert i tabellen vist i den aktuelle symboltabellen i vedlegget, men du kan selv definere en passende bokstavkode. Det er ikke krav om at symbolene skal angi plasseringen av instrumentene i anlegget (du kan altså bruke et enkelt sirkel-symbol for instrumentene). Det er ikke krav om at kodene skal vise hvorvidt måleverdier blir indikert på regulatorene.

### Oppgave 3 (5%)

Anta at en dp-celle (differensialtryksensor) brukes til å måle nivået av olje i en oljetank der det er atmosfæretrykk over oljeoverflaten. Sensoren måler det statiske trykket i et punkt i et avstengt rør ut av bunnen av tanken. Målepunktet befinner seg 0,5 meter under oljens bunnivå. Oljens tetthet antas å være  $850 \text{ kg/m}^3$ . Hvis målesignalet viser 0,1 bar, hva er da oljenivået i tanken?

### Oppgave 4 (10%)

Utvikle en matematisk modell (en differensiallikning) for nivået i tanken vist i figur 3.



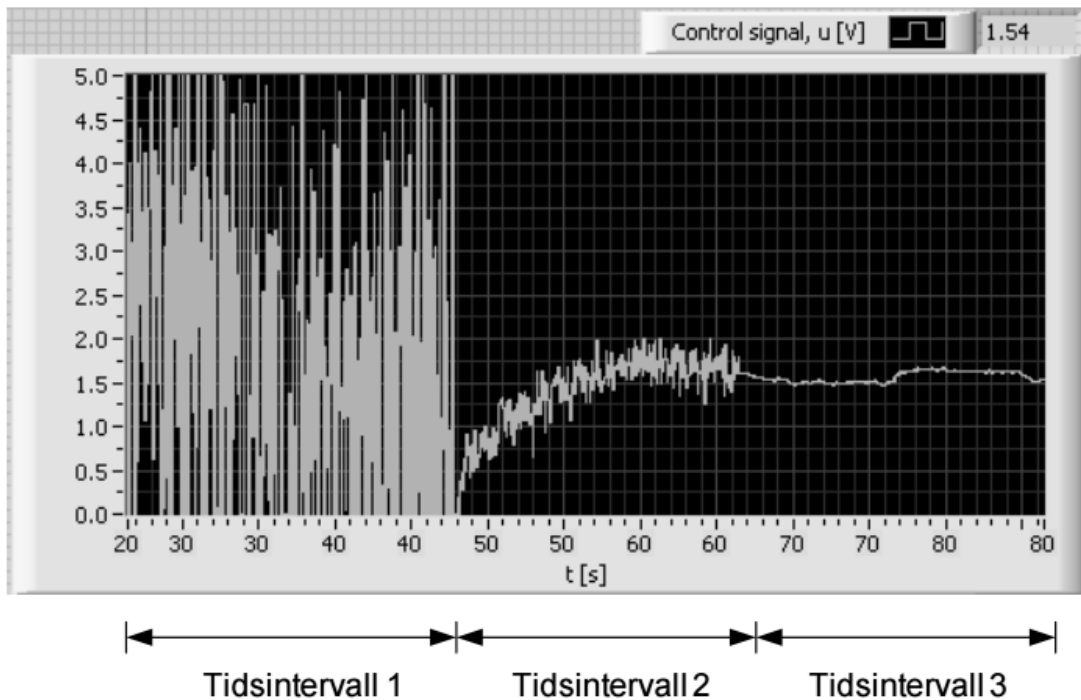
Figur 3

**Oppgave 5 (10%)**

- (7%) Tegn et blokkdiagram av et generelt reguleringsystem som består av både tilbakekopling og foroverkopling. Forklar systemets virkemåte.
- (3%) Nevn tre eksempler på prosessforstyrrelser som det kan være fordelaktig å foroverkople fra (eksempelene kan være fra forskjellige anvendelser).

**Oppgave 6 (6%)**

Figur 4 viser pådragssignalet til varmeelementet i et temperaturreguleringsystem for en varmluftprosess. Nederst i figur 2 er tre ulike tidsintervaller angitt.

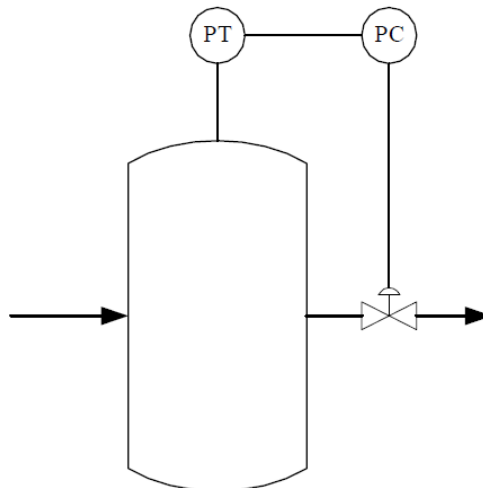


Figur 4

Angi, med en kort begrunnelse, hvilken av følgende tre regulatorer som er i bruk for hvert av de tre tidsintervallene: (1) PID-regulator med målefilter. (2) PI-regulator med målefilter. (3) PID-regulator uten målefilter. (Du skal altså angi én regulator for hvert av tidsintervallene.)

### Oppgave 7 (5%)

Figur 5 viser et trykkguleringsystem. Anta at en økning av pådragssignalet til ventilen reduserer ventilåpningen. Skal regulatoren ha revers- eller direktevirkning? (Svaret skal begrunnes.)



Figur 5

### Oppgave 8 (6%)

Beskriv, med tekst og en illustrativ tegning, Skogestads metode for innstilling av en PI-regulator der en betrakter prosessen som et tilnærmet «integrator med tidsforsinkelse»-system.

### Oppgave 9 (8%)

De aller fleste tilbakekoblede reguleringsystemer får forverret stabilitet dersom sløyfeforsterkningen øker og/eller dersom tidsforsinkelsen i sløyfen øker.

- (3%) Gi et praktisk eksempel på økt sløyfeforsterkning (men velg her et annet eksempel enn økt forsterkning i regulatoren) og et praktisk eksempel på økt tidsforsinkelse i sløyfen.
- (5%) Anta at for et gitt reguleringsystem har forsterkningen i prosessen økt med en faktor på 3 og samtidig har tidsforsinkelsen i prosessen økt med en faktor på 2. Regulatoren er en PI-regulator som har god innstilling ( $K_{p0}$ ,  $T_{i0}$ ) før disse parameterendringene (du kan anta at denne innstillingen stammer fra Skogestads metode). Hva bør PI-innstillingen endres til ( $K_{p1}$ ,  $T_{i1}$ ) etter parameterendringene?

### Oppgave 10 (15%). Om styring av småkraftverk.

- (8%) Beskriv hvordan vannstand i et inntak for et småkraftverk normalt reguleres ved varierende tilsig – varierende fra tilnærmet 0 på kald vinter / tørt sommer og opp mot tilsig som overstiger maksimal turbinvannføring i sterke regnperioder / vårflo. Beskrivelsen skal vise hvordan en bruker mest mulig av tilgjengelig tilsig og at en kan regulere vannstanden i magasinet f.eks. 0,5 m, men at vannstanden bør være høyest mulig i de perioder drifta av kraftverket tillater dette. Ta hensyn til at kraftverket vil ha minstevannføring på 50 Liter/s

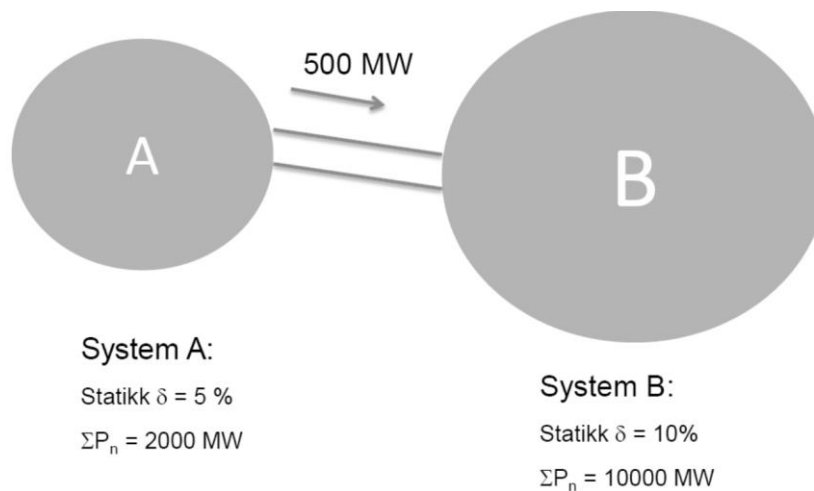
som slippes fra inntaket og at minstevannføringen er prioritert foran all produksjon – og at turbinen har en 'stopp-vannføring' f.eks. 50 % av fullstavnføring på 1,5 m<sup>3</sup>/s. Ta utgangspunkt f.eks. i et inntaksmagasin med overflate ca. 2500 m<sup>2</sup>.

- (4%) Hvilken type regulering ville du foreslå for styring av vannstanden i inntaket til kraftverket og hvilke av de fire driftsmodi du har nevnt ovenfor benyttes reguletegenskapene.
- (3%) Hvor stor maksimal effekt gir dette kraftverket når netto fallhøyde er 100 m – benytt produktet av virkningsgrad og tyngdens akselerasjon lik 8 m/s<sup>2</sup> – og formelen for effekt er

$$P = \rho \eta g H Q_{\max} \quad [\text{kg/m}^3] \cdot [1] \cdot [\text{m/s}^2] \cdot [\text{m}] \cdot [\text{m}^3/\text{s}]$$

### Oppgave 11 (15%). Regulering av frekvens i kraftsystem med lastutfall.

Figur 6 viser to deler av et synkront kraftsystem, A og B, hvor det er i drift kraftverk med samlet merkeytelse 2000 MW i system A og 10000 MW i system B.



Figur 6

Gjennomsnittlig statikk i område A er 5 % og i område B 10 %. Regulerstyrke R [MW/Hz] beregnes fra følgende formel:

$$R = -2 P_n / \delta \quad [\text{MW}] / [\%]$$

R – regulerstyrke

P<sub>n</sub> – Merkeytelse for system / maskin

$\delta$  - innstilt statikk på aggregatenes turbinregulatorer

Det faller ut et smelteverk i område B med 280 MW last.

- (5%) Beregn stasjonær frekvens etter at primærregulatorerne i systemet har 'roet' systemet ned etter forstyrrelsen når frekvensen før utfallet var 49,95 Hz.
- (5%) Dette utfallet skjer i en periode på ettermiddag hvor lasten forventes å synke og i driftsentralen som overvåker frekvensendringene i system beslutter å bringe frekvensen tilbake til nominell verdi ved å regulere ned et aggregat med 100 MW i system A og regulere ned produksjon for å nå 50,0 Hz i system B når en for denne oppgaven forutsetter at øvrig

belastning i systemet forblir konstant. Hvor stort blir totalt bidrag fra sekundærreguleringen fra system A og B?

- c) (5%) Hva blir effektoverføringen fra A til B etter nevnte utfall og primærreguleringsperioden inntil stasjonær frekvens når overføringen før utfallet var 500 MW fra A til B?

# Formelliste (identisk med formellisten i Reguleringssteknikk, 2. utgave)

$$e = y_{SP} - y \quad (\text{C.1})$$

$$\text{IAE} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{slutt}}} |e(t)| dt \approx T_s \sum_{t_1=t_{\text{start}}}^{t_N=t_{\text{slutt}}} |e(t_k)| \quad (\text{C.2})$$

$$F_{2SP} = KF_1 \quad (\text{C.3})$$

$$y_d = \frac{b_{n-1}2^{n-1} + \dots + b_12^1 + b_02^0}{2^n - 1} (y_{a_{\text{maks}}} - y_{a_{\text{min}}}) + y_{a_{\text{min}}} \quad (\text{C.4})$$

$$R = \frac{y_{a_{\text{maks}}} - y_{a_{\text{min}}}}{2^n - 1} \quad (\text{C.5})$$

$$P = \frac{P_2 - P_1}{M_2 - M_1} (M - M_1) + P_1 \quad (\text{C.6})$$

$$T_f \dot{y}_{mf}(t) = y_m(t) - y_{mf}(t) \quad (\text{C.7})$$



$$y_{mf}(t_k) = (1 - a)y_{mf}(t_{k-1}) + ay_m(t_k) \quad (\text{C.8})$$

$$a = \frac{T_s}{T_f + T_s} \quad (\text{C.9})$$

$$\tau_{\text{rampe}} = T_f \quad (\text{C.10})$$

$$T_f \approx \frac{T_s}{2} \frac{1}{(\sigma_{y_{mf}}/\sigma_{y_m})^2} \quad (\text{C.11})$$

$$T_f \leq \frac{T_p}{10} \quad (\text{C.12})$$

$$T_f \leq \frac{\tau_p}{10} \quad (\text{C.13})$$

$$y_{mf}(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=k-(N-1)}^{j=k} y_m(t_j) \quad (\text{C.14})$$

$$T_f \approx \frac{T_v}{2} \quad (\text{C.15})$$

$$u_{se} = \frac{u_{se2} - u_{se1}}{u_{fe2} - u_{fe1}} (u_{fe} - u_{fe1}) + u_{se1} \quad (\text{C.16})$$

$$\tau_{\text{DA-omsetter}} \approx \frac{T_s}{2} \quad (\text{C.17})$$

$$D = \frac{T_{\text{on}}}{T_p} \cdot 100\% = \frac{u_{\text{mean}}}{U_{\text{on}}} \cdot 100\% \quad (\text{C.18})$$

$$Q = K_v(z) \sqrt{\frac{p_v}{G}} \text{ eller } K_v \sqrt{\frac{p_v}{G}} \quad (\text{C.19})$$

$$K_v(z) = K_{v_{\text{max}}} z \quad (\text{C.20})$$

$$K_v(z) = K_{v_{\max}} R^{1-z} \quad (\text{C.21})$$

$$P_{\text{midlere}} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R} \quad (\text{C.22})$$

$$R_s = \frac{R}{L} \text{ [}\Omega/\text{m]} \quad (\text{C.23})$$

$$R \text{ [}\Omega] = \frac{u}{i} \quad (\text{C.24})$$

$$R = \frac{S}{2^n - 1} \quad (\text{C.25})$$

$$v_0(T_m) = v + v_0(T_r) \quad (\text{C.26})$$

$$T = \frac{\frac{R}{R_0} - 1}{a} \quad (\text{C.27})$$

$$L = \frac{vT_r}{2} \quad (\text{C.28})$$

$$p = \rho g(h + h_0) \quad (\text{C.29})$$

$$F = k\sqrt{\Delta p} \quad (\text{C.30})$$

$$v = k(t_{\text{mot}} - t_{\text{med}}) \quad (\text{C.31})$$

$$Q = Av \quad (\text{C.32})$$

$$F_v = \frac{F_m}{\rho} \quad (\text{C.33})$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = kF \quad (\text{C.34})$$

$$v(t_k) = \frac{ds(t_k)}{dt} \approx \frac{s(t_k) - s(t_{k-1})}{T_s} \quad (\text{C.35})$$

$$v(t_k) \approx \frac{s(t_{k+1}) - s(t_{k-1})}{2T_s} \quad (\text{C.36})$$

$$u_t = K_t v \quad (\text{C.37})$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = \sum w_{\text{inn}}(t) - \sum w_{\text{ut}}(t) + \sum w_{\text{generert}}(t) \quad (\text{C.38})$$

$$m = \rho V \quad (\text{C.39})$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum Q_{\text{inn}} - \sum Q_{\text{ut}} + \sum Q_{\text{generert}} \quad (\text{C.40})$$

$$E = cmT = c\rho VT = CT \quad (\text{C.41})$$

$$m\dot{v} = m\ddot{x} = ma = \sum F \quad (\text{C.42})$$

$$J\dot{\omega} = J\ddot{\theta} = \sum T \quad (\text{C.43})$$

$$T = Fl \quad (\text{C.44})$$

$$b = \theta r \quad (\text{C.45})$$

$$u = Ri \quad (\text{C.46})$$

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (\text{C.47})$$

$$P_{\text{midlere}} = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = R I_{\text{eff}}^2 = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R} \quad (\text{C.48})$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \quad (\text{C.49})$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \quad (\text{C.50})$$

$$u = u_t + u_f \quad (\text{C.51})$$

$$K = \frac{y_2 - y_1}{u_2 - u_1} = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (\text{C.52})$$

$$T\dot{y} = Ku - y \quad (\text{C.53})$$

$$T\dot{y} = K_1 u_1 + K_2 u_2 - y \quad (\text{C.54})$$

$$\dot{y} = K_i u \quad (\text{C.55})$$

$$y(t) = K_i \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (\text{C.56})$$

$$y(t) = u(t - \tau) \quad (\text{C.57})$$

$$u(t) = u_{\text{man}} + K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$e = y_{SP} - y_{mf} \quad (\text{C.58})$$

Tabell C.1:

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P-regulator	$0,5K_{pu}$	$\infty$	0
PI-regulator	$0,45K_{pu}$	$\frac{P_u}{1,2}$	0
PID-regulator	$0,6K_{pu}$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8} = \frac{T_i}{4}$

$$PB = \frac{100}{K_p} \quad (C.59)$$

$$u(t_k) = u_{\text{man}} + u_p(t_k) + u_i(t_k) + u_d(t_k) \quad (C.60)$$

$$u_p(t_k) = K_p e(t_k) \quad (C.61)$$

$$u_i(t_k) = \frac{K_p T_s}{T_i} [e(t_0) + e(t_1) + \dots + e(t_{k-1}) + e(t_k)] \quad (C.62)$$

$$= u_i(t_{k-1}) + \frac{K_p T_s}{T_i} e(t_k) \quad (C.63)$$

$$u_d(t_k) = K_p T_d \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T_s} \quad (C.64)$$

$$\text{“Opp-Ned”} \implies \text{Revers} \equiv K_p > 0 \quad (C.65)$$

$$\text{“Opp-Opp”} \implies \text{Direkte} \equiv K_p < 0 \quad (C.66)$$

$$u = \left\{ \begin{array}{l} u_{\text{maks}} \text{ når } e \geq d_e \\ u_{\text{min}} \text{ når } e < -d_e \end{array} \right\} \quad (C.67)$$

$$K_p = 0,32K_{pu}, \quad T_i = P_u \quad (C.68)$$

$$K_p = 0,45K_{p0}, \quad T_i = \frac{P_{u0}}{1,2} \quad (C.69)$$

$$K_{p_u} = \frac{\text{Ut-amplitude}}{\text{Inn-amplitude}} = \frac{\frac{4A}{\pi}}{E} = \frac{4A}{\pi E} \approx 1,27 \frac{A}{E} \quad (\text{C.70})$$

$$A = \frac{u_{\text{maks}} - u_{\text{min}}}{2} \quad (\text{C.71})$$

$$K_p = 0,8K_{GG}, \quad T_i = 1,5T_{ou} \quad (\text{C.72})$$

$$K_p = \frac{1}{K_i(T_C + \tau)}, \quad T_i = 2(T_C + \tau) \quad (\text{C.73})$$

$$T_C = \tau, \quad K_p = \frac{1}{2K_i\tau}, \quad T_i = 4\tau \quad (\text{C.74})$$

$$K_p = \frac{1}{K_i T_c}, \quad T_i = 2T_c \quad (\text{C.75})$$

$$T_d = T_{\text{aktuator}} \quad (\text{C.76})$$

$$\ddot{y} = K_{ii}u$$

$$K_p = K_{pp} = \frac{2}{K_{ii} T_C^2} \quad (\text{C.77})$$

$$T_i = T_{ip} = 4T_C \quad (\text{C.78})$$

$$T_d = T_{dp} = T_C \quad (\text{C.79})$$

Bokstav- kode	1. bokstav	Etterfølgende modifikator til 1. bokstav	Etterfølgende bokstav
A	Analysis		Alarm
B	Burner, Combustion		
C	User's choice		Control
D	User's choice	Differential	
E	Voltage		Sensor, Primary element
F	Flow rate	Ratio	
G	User's choice		Glass, Gauge
H	Hand		High
I	Current (electrical)		Indicate
J	Power		
L	Level		Low
P	Pressure		
Q	Quantity	Integrate, Totalize	
R	Radiation		Record
S	Speed, Frequency		Switch
T	Temperature		Transmit
V	Vibration		Valve
W	Weight, Force		
Y			Computation
Z	Position	Safety Instrumented System (Interlock)	

Bokstavkode	Utstyr
C	Column (norsk: kolonne, f.eks. destillasjonskol.)
D	Drum (kar, fat, dunk)
F	Furnace (ovn)
H	Heat exchanger (varmeveksler)
K	Compressor
M	Motor
P	Pump
R	Reactor
T	Tank
V	Valve, vessel (ventil, beholder)