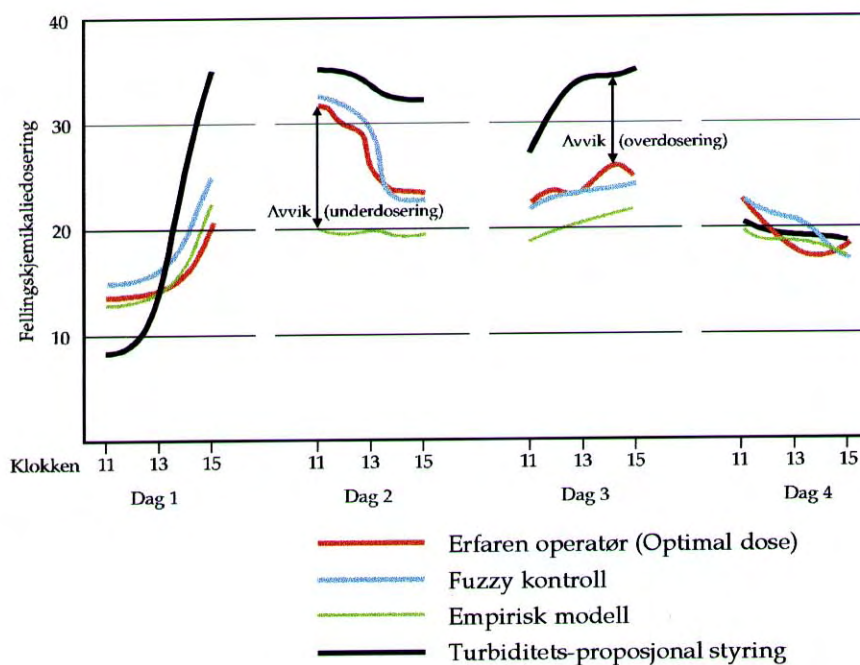


Fuzzy kontroll i vannbehandling

FORPROSJEKT



NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Prosjektnr.:	Undernr.:
O 95248	
Løpenr.:	Begr. distrib.:
3393	Åpen

Hovedkontor	Sørlandsavdelingen	Østlandsavdelingen	Vestlandsavdelingen	Akvaplan-NIVA A/S
Postboks 173, Kjelsås	Televeien 1	Rute 866	Thormøhlensgt 55	Søndre Tollbugate 3
0411 Oslo	4890 Grimstad	2312 Ottestad	5008 Bergen	9000 Tromsø
Telefon (47) 22 18 51 00	Telefon (47) 37 04 30 33	Telefon (47) 62 57 64 00	Telefon (47) 55 32 56 40	Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 22 18 52 00	Telefax (47) 37 04 45 13	Telefax (47) 62 57 66 53	Telefax (47) 55 32 88 33	Telefax (47) 77 68 05 09

Rapportens tittel: Fuzzy kontroll i vannbehandling FORPROSJEKT	Dato:	Trykket:
	15/1/96	NIVA 1996
Forfatter(e): Harsha C. Ratnaweera J. Finnur Olafsson	Faggruppe:	
	Vannforsyning	
	Geografisk område:	
	Norge	
	Antall sider:	Opplag:

Oppdragsgiver: Drikkevannsforskning mot år 2000, Norges forskningsråd	Oppdragsg. ref.: 110255/431 Asle Aasen
--	---

Ekstrakt: Fokuseringen på kjemisk vannrensing vil bli økt med de nye vannforskriftene i Norge. Krav til prosessstabilitet, rensegrad, rest kjemikalier og økonomi vil øke med tiden. Sanntids prosessstyring vil være den eneste konkurrerbare metoden i fremtiden. Mens andre sanntidsstyringsmetoder krever nøyaktige matematiske likninger for å modellere virkeligheten, kan fuzzy design takle motsigelser i menneskelig språk og logikk. Fuzzy logikk tilbyr et rammeverk for integrering av informasjon fra operatører, ekspertkunnskap, "black box" modeller og matematiske modeller for å konstruere styringsmetoder for sanntidsstyring av vannrenseanlegg. Styring av fellingskjemikalier dosering er en av de viktigste aktiviteter i et renseanlegg under optimal og økonomisk drift. I denne rapporten vurderer vi dette som et eksempel for å belyse nytten av å bruke et fuzzy styringskonsept.

Litteratursøk viser at få applikasjoner eksisterer med fuzzy kontroll innen vannbehandling, og disse er hovedsakelig i Japan. Kvantitative fordeler er vanskelig å dokumentere, men litteratur viser til betydelige muligheter for å spare fellingskjemikalier. En konsistent og forbedret vannkvalitet, optimal utnyttelse av ressursbruk (kjemikaliedosering, slamproduksjon, mann-timer) og driftsstabilitet er forventede fordeler med fuzzy i vannbehandling. Fuzzy kontroll kan brukes for overordnet styring av alle delprosessene i et vannverk, inklusiv dosering av fellingskjemikalier dosering, karbondioksid/lut dosering, filtrering etc. Fuzzy kontroll system kan simulere en erfaren operatør som manuelt optimaliserer prosessen til enhver tid, og dermed kan være vel egnet for små vannverk så vel som for store vannverk.

4 emneord, norske

1. Vannbehandling
2. Kjemisk felling
3. Sanntidsprosessstyring
4. Fuzzy logikk

4 emneord, engelske

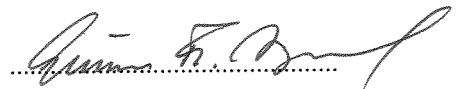
1. Water treatment
2. Chemical coagulation
3. Real-time process control
4. Fuzzy logic

Prosjektleder



Harsha C. Ratnaweera

For administrasjonen



Gunnar Fr. Aasgaard

ISBN 82-577-2924-8

Innhold

FORORD	2
1. INNLEDNING	3
2. FELLING OG FILTRERING SOM HOVEDRENSEPROSESS	4
3. TILSETTING AV FELLINGSKJEMIKALIER: DAGENS TEKNOLOGI	5
3.1 PROSESSENS AVHENGIGHET AV FLERE PARAMETRE: NOEN EKSEMPLER.....	5
3.2. FAST DOSERING	6
3.3. MENGDE PROPORSJONAL DOSERING	6
3.4 MENGDE-PROPORSJONAL DOSERING MED PERIODEVIS MANUELL OVERSTYRING	6
3.5 TURBIDITETSPROPORSJONAL DOSERING	6
3.6 FARGEPROPORSJONAL DOSERING	6
3.7 FNOK SENSOR	7
3.8 PARTIKKELSTØRRELSMÅLING	7
3.9 ZETA POTENSIAL.....	7
3.10 STREAMING CURRENT DETECTOR (SCD).....	7
3.11 EMPIRISKE METODER.....	7
4. REGULERINGSTEKNIKK SOM ET EFFEKTIV VERKTØY FOR OPTIMAL DOSERING	9
4.1 REGULERINGSSTRUKTURER.....	10
4.1.1 Foroverkopling	10
4.1.2 Tilbakekopling	10
4.1.3 Kombinasjon av forover- og tilbakekopling	11
4.2 REGULATORALGORITMER.....	11
4.2.1 Black box modeller	11
4.2.2 Deterministiske modeller	12
4.2.3 Fuzzy modeller.....	13
5. FUZZY KONTROLL I VANNRENSING	14
5.1 FUZZY KONTROLL - EN INTRODUKSJON	14
5.2 APPLIKASJONER MED FUZZY STYRING: LITTERATUROVERSIKT	15
5.4 PATENTSØK	17
5.5 EKSEMPLER PÅ BRUK AV FUZZY KONTROLL I ANDRE PROSESSER.....	18
6. FORESLÅTT FUZZY SYSTEM	21
6.1 ON-LINE FUZZY SYSTEM	21
6.2 BESLUTNINGSTØTTE FOR OPERATØRER	21
6.3 FORVENTEDE FORDELER MED BRUK AV FUZZY KONTROLL I VANNRENSING.....	22
6.3.1 Generelle fordeler.....	22
6.3.2 Fordeler ved bruk av fuzzy teknologi.....	22
6.3.3 Ulemper ved bruk av fuzzy teknologi.....	23
6.3.4 Kvantifisering av fordeler.....	23
7 KONKLUSJONER	25
REFERANSER	26
VEDLEGG	28
A. RESULTAT AV PATENTSØK	28

FORORD

Forskningsprogrammet "Drikkevannsforskning mot år 2000" ble etablert i 1995 og vil være orientert mot forskningsområder for bedring av drikkevannskvaliteten, og vil ta opp problemstillinger knyttet til gjennomføring av "Program for vannforsyning".

I prosessen for betydelig forbedring av kvalitet av vannforsyning i Norge, er det all grunn til å tro at betydningen av avanserte vannrensing vil bli økt. Samtidig, vil krav til prosesstabilitet, rensegrad, restkjemikalier og økonomi øke med tiden. Sanntids prosesstyring vil være den eneste konkurrerbare styringsmetoden i fremtiden.

Et nytt sanntidsstyringskonsept basert på "fuzzy logikk" er tatt i bruk i mange prosesser i dag. Vi tror at ved bruk av fuzzy logikk i vannbehandling kan prosessen effektiviseres betydelig. Denne rapporten presenterer mulig anvendelse av fuzzy logikk i vannbehandling, basert på en litteratur-/status gjennomgang av anvendelsen og problemene knyttet til dagens prosesstyring i en av de mest potensielle anvendelsesområder - styring av fellingskjemikaliedosering.

Forprosjektet er finansiert av programmet "Drikkevannsforskning mot år 2000", og skal danne grunnlag for vurdering for etablering av et demonstrasjonsprosjekt i samarbeide med Høgskolen i Sogn og Fjordane - avd. for ingeniør utdanning, Asplan VIAK og NIVA.

*Harsha C. Ratnaweera
J. Finnur Olafsson*

Brekke, 15.01.96

1. INNLEDNING

Styring av fellingskjemikalier dosering er en av de viktigste aktiviteter i et renseanlegg under optimal og økonomisk drift. I denne rapporten vurderer vi dette som et eksempel for å belyse nytten av å bruke et fuzzy styringskonsept.

Kjemisk felling er en av hovedrenseprosessene som brukes for fjerning av humus fra drikkevann i Norge. Etter at kravene til drikkevannskvalitet har blitt strengere, antas det at enda flere norske anlegg vil anvende kjemisk rensing i de nærmeste årene. For å oppfylle de strenge vannkvalitetskravene samtidig med en økonomisk forsvarlig behandling, velger man strengere prosessbetingelser som kan gjøre prosessen meget følsom og krevende. Følgende krav kan bli stilt til et slikt anlegg:

- mindre forbruk av fellingskjemikalier
- lavere restkonsentrasjoner av aluminium/jern i rensset vann
- lavt forbruk av andre kjemikalier (lut, karbondioksid, etc)
- optimal pH under fellingsprosessen
- lengre filtreringssykluser
- håndtering av variasjoner i råvannskvalitet
- håndtering av nødsituasjoner
- mindre slamproduksjon
- lavere driftskostnader generelt
- registrering av vannkvalitetsdata
- mer konsistent kvalitet på rensset vann

Følsomheten i prosesstabiliteten øker med mer fokusering på de ovennevnte krav. Erfaringer fra eksisterende anlegg viser at det oppstår problemer med driftsstabiliteten i slike anlegg. I flere tilfeller benytter man manuell justering av driftsparametrene for å øke eller å gjenopprette driftsstabiliteten.

Dersom det hadde eksistert en fysisk modell for kjemisk rensing som beskriver prosessen i alle driftstilstander, kunne en helautomatisk optimal drift av anlegget ha vært mulig. Modeller for renseprosesser, i den grad de eksisterer, er kompliserte, lite nøyaktige og egner seg dårlig for design av regulatorer. Derfor er det vanlig at man bruker en konstant dosering bestemt av pilotforsøksresultater. Manuell overstyring er fortsatt nødvendig i enkelte tilfeller.

Effektivitet i manuell overstyring er avhengig av operatørens prosesskunnskap og erfaringer med de aktuelle anlegget. Kjemisk felling er en komplisert prosess som involverer flere parametre og for en operatør er det vanskelig å ta hensyn til flere enn 2-3 parametre om gangen. Dette kan resultere i feil beslutninger som ikke bidrar til forbedret vannkvalitet eller økt stabilitet. Det ligger derfor et stort potensiale for forbedring av styringssystemer i vannrenseanlegg.

I flere år har "Fuzzy logikk" konseptet vært i bruk for å håndtere tilsvarende kompliserte problemstillinger effektivt i mange prosesser. Konseptet antas å kunne anvendes i effektiv vannbehandling, og skal kunne håndtere delprosesser som koagulering og filtrering, herunder prosessovervåkning, fellingskjemikaliedosering, pH-justering, dosering av lut/karbondioksid eller andre kjemikalier og drift av filtreringsprosesser.

Formålet med denne rapporten er å beskrive fuzzy logikk og kontroll, undersøke eksisterende og potensielle fuzzy anvendelser i vannrensing (eksempelvis i styring av fellingskjemikaliedosering), og beskrive og evt. kvantifisere fordeler.

2. FELLING OG FILTRERING SOM HOVEDRENSEPROSESS

Nesten alle typer råvann som brukes i norske vannverk har farge verdier dårligere enn veiledende verdi for rensset vann i det nye vannforskriftene, mens over 60% har råvann dårligere enn veiledende turbiditetetsverdi (VREG, 1994). Dette viser betydningen av avanserte renseprosesser for å oppnå de nye vannforskriftenes mål. D.v.s. at kjemisk felling, membran filtrering eller ionebytting må brukes som hovedrenseprosess i de fleste vannverk. Erfaringer fra Norge og verden forøvrig viser at kjemisk rensing er den mest økonomiske prosessen for store og middelstore vannverk, basert på dagens teknologi. Felling er også konkurransedyktig i små vannverk, men p.g.a. store sesongvariasjoner og lav alkalitet kan det være vanskelig å få stabilt kvalitet på rentvannet uten et rimelig sterkt tilsyn.

Felling er en meget robust og økonomisk prosess for vannverk i alle størrelser, dersom prosessen kan styres optimalt. Prosessen er hovedsakelig avhengig av farge (naturlig organisk materiale), turbiditet, suspendert stoff, pH og alkalitet i råvannet. Type og mengde av fellingskjemikalier, doserings- og innblandings-metoder er de driftsparametrene som påvirker prosessen.

En optimal prosess krever rask tilpasning av styrbare variabler (f.eks. fellingskjemikaliedosering, pH-justering, dosering av lut/karbondioksid eller andre kjemikalier og drift av filtreringsprosesser) til ikke-styrbare variabler (farge, pH, turbiditet, etc., som en følge av sesongvariasjoner, uhell, regn, flom, o.s.v.) til optimale nivå. Anleggenes muligheter for å gjøre dette effektivt avgjør robustheten og økonomien i prosessen.

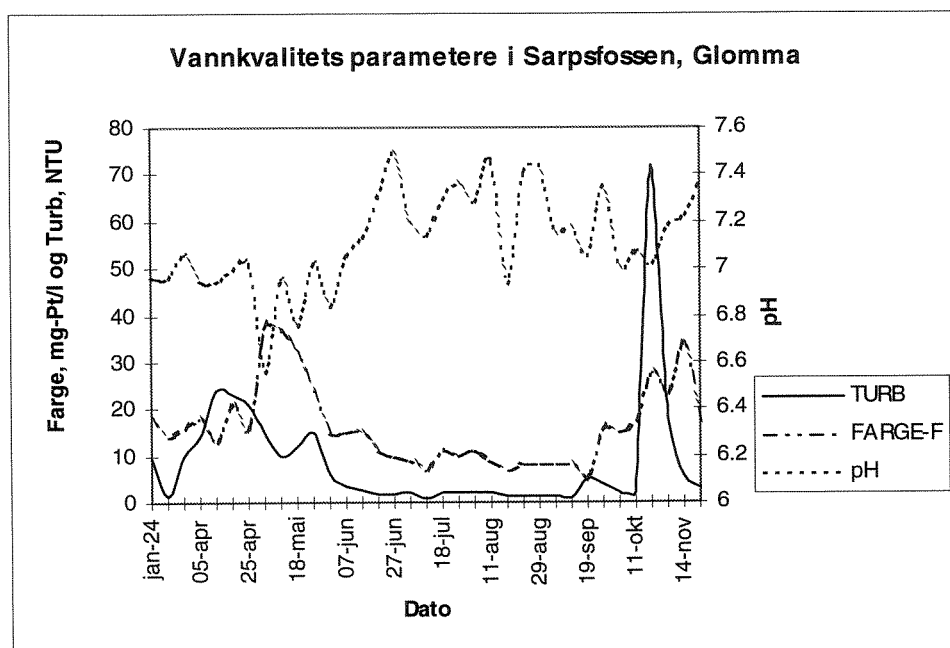
Fellingsprosessen krever et etterfølgende fnokk-separasjonstrinn. Separasjonstrinnet kan være direkte filtrering, sedimentering eller flotasjon. Økonomi og robusthet i alle tre separasjonsprosesser er avhengig av fellingsprosessen.

Arbeidet med å finne økonomiske og robuste prosesser som vil oppfylle norske vannkvalitetsmål i fremtiden vil nødvendigvis øke aktualiteten av optimal styring av prosessene.

3. TILSETTING AV FELLINGSKJEMIKALIER: DAGENS TEKNOLOGI

3.1 Prosessens avhengighet av flere parametre: noen eksempler

- Turbiditet forbruker fellingsmiddel
 - Farge (NOM) forbruker fellingsmiddel
 - Fellingsprosessen har et optimalt pH område
 - Alkalitet forbruker fellingsmiddel
 - Alkalitet hjelper å holde pH innenfor arbeidsområdet også ved høye doseringer
 - Råvann med høy pH må ha lavere fellings-pH enn surt råvann
 - Temperaturen påvirker fnokkoppbyggingen. Lav temperatur kan medføre økt forbruk av fellingskjemikalier
 - Høy vannføring krever høyere dose av fellingskjemikalier
 - Høyt partikkelinnhold krever høy dose av fellingskjemikalier
 - Høy kjemikaliedosering resulterer i høye slammengder med høy andel av hydroksid slam
 - Høy kjemikaliedosering gir økte driftskostnader
 - Høy kjemikaliedosering gir kortere filtersykluser
 - For høy eller for lav pH vil gi høyt restaluminiuminnhold i rensset vann
 - For lav farge fjerning vil øke fare for THM dannelse
- *Ingen av de ovennevnte sammenhenger er lineære eller uavhengige.*



Figur 1: Vannkvalitetsendringer med tiden (Lingsten, 1984).

3.2. Fast dosering

Fast dosering uavhengig av råvannsmengde eller andre parameter er ofte brukt i små vannverk. Dosen er ofte fastsatt av prosess- leverandøren baseres på en jar-test forsøk. Kvaliteten og økonomien varieres følgelig som en konsekvens av forholdene beskrevet i § 3.1.

3.3. Mengde proporsjonal dosering

I Norge, og i verden forøvrig, er mengde-proporsjonal dosering den vanligste metoden for å dosere fellingskjemikalier i store og mellomstore vannverk. I de fleste råvannskilder er det vanlig å observere variasjoner i farge, suspendert stoff, pH, alkalitet og turbiditet p.g.a. forskjellige årsaker som sesong, regn, flom, uhell, etc (se *Figur 1*).

Naturlige variasjoner av nøkkelparametrene i råvannskilder er umulig å unngå i praksis. Prosessavhengigheten presentert i § 3.1 bekrefter at en mengde-proporsjonal dosering ikke vil kunne fungere optimalt.

3.4 Mengde-proporsjonal dosering med periodevis manuell overstyring

Dette konseptet er brukt i de vannverkene som har personale (eller tilgang til leverandører) for å gjennomføre jar-test forsøk for å vurdere “uvanlige” råvannssituasjoner. I praksis må vannverkene manuelt justere doseringen uavhengig av tilgjengelig kompetanse eller tilgjengelighet på faglige råd for håndtering av slike situasjoner.

3.5 Turbiditetsproporsjonal dosering

Turbiditet er generelt i bruk for prosessovervåkning i vannverk både i Norge og internasjonalt. Likevel, bruk av turbiditetsmålinger til fellingsmiddeldosering er ikke lett (Dentel, 1991). Dette fordi en slik system er avhengig av feilfri turbiditetsmålinger og bruk av en effektiv algoritme som forklarer doseringsvariasjoner med turbiditetsvariasjoner. Erfaringer viser at dette konseptet ennå ikke er utviklet til et tilstrekkelig nivå slik at den kan anvendes.

De fleste av problemene assosiert med konseptet kan unngås ved bruk av målinger på turbiditet av rensset vann, men dette vil introdusere en lang tidsforsinkelse (prosesstid inkludert filtreringstid).

For norske forhold kan ikke turbiditet alene brukes som styringsgrunnlag da humusinnholdet spiller en viktigere rolle i prosessen enn turbiditeten.

3.6 Fargeproporsjonal dosering

Konseptet ligner på turbiditetsproporsjonal dosering, og har nesten de samme fordeler og ulemper. Fellingskjemikalieforbruket for fjerning av farge er avhengig av pH i vannet. Derfor vil fargemåling alene ikke kunne brukes til effektiv dosering. Bruk av en kombinasjon vil teoretisk kunne gi gode resultater, dersom en troverdige algoritme kan utvikles, og utstyringsproblemer kan håndteres.

3.7 Fnok sensor

Fnokkoppybygging under flokkuleringstrinnet kan godt korreleres mot fellingsprosessens effektivitet. Ved hjelp av høy hastighets bildebehandlingsteknologi, er det utviklet et fellingskjemikaliedoseringskontroll system i Japan (Baba et al., 1988). Prosessen er under vurdering i flere større vannverk i Japan, men det foreligger enda ikke bekreftede fullskalaresultater.

3.8 Partikkelstørrelsemåling

Partikkelstørrelse kan brukes på to måter i doseringskontroll. Dersom partikkelinnholdet er den viktigste fellingskjemikalie forbruker, kan partikkelstørrelsemåling i råvannet brukes til doseringskontroll. Dersom andre faktorer spiller en viktigere rolle i forbruket av fellingskjemikalie (f. eks. farge) kan partikkelstørrelsemåling i tidlig flokkuleringfase kan gi et godt grunnlag for doseringsstyring. Det største problemet forbundet med denne metoden er måleinstrumentenes pris, pålitelighet og vedlikehold.

Gregory (1985) har utviklet en optisk "fnokk sensor" som resulterer i et signal proporsjonal til partikkelinnholdet i råvannet, og som kan korreleres mot fnokkenes sedimenteringshastighet. Prosessen er under utprøving i fullskala anlegg. Systemet antas å fungere bra dersom området for partikkel størrelse ikke forandres (Dentel, 1991).

3.9 Zeta potensial

Zeta potensial i råvann eller koagulert vann kan gi et godt grunnlag for doseringsstyring, dersom brukes i sammenheng med pH. Per idag eksisterer ikke utstyr egnet for fullskala bruk.

3.10 Streaming current detector (SCD)

SCD kan betraktes som en forenklet ladningsmåler. Utstyret brukes idag i en del anlegg i USA, men har ikke fått gode resultater i Norge (Storahaug, 1994). Det antas at konseptet er anvendbart dersom resultatene kan kombineres med pH og utstyret er pålitelig. Dentel (1991) har studert anvendelse av SCD for doseringskontroll og har dokumentert ulemper og fordeler.

3.11 Empiriske metoder

Oppsummering av § 3.2-3.10 viser til eksistens av et antall metoder som kan danne grunnlag for styring av fellingskjemikaliedosering. Den største svakheten i de ovennevnte metodene er at de ikke kan fungere alene som styringsmetoder, men krever en kombinasjon av flere metoder. En slik kombinasjon krever bruk av empiriske modeller (en algoritme) med intelligente reguleringstekniske løsninger (se § 4).

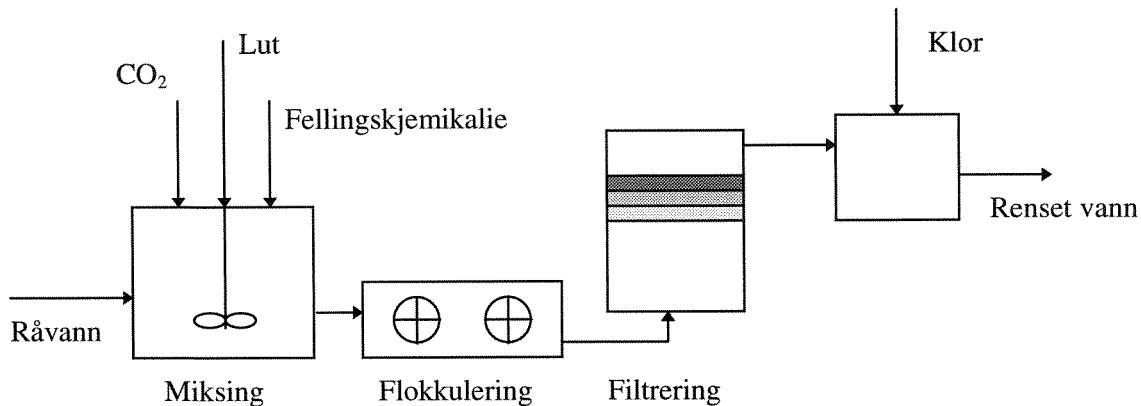
Aztec Environmental Control Ltd i England har utviklet og markedsfører et sanntids styringssystem for fellingskjemikaliedosering i drikkevannsrenseanlegg (Aztec, 1993). De bruker en algoritme av typen $Dose = k_1 \cdot Farge + k_2 \cdot Turbiditet + k_3$, hvor k_3 er en konstant som er avhengig av råvannets pH, ledningsevne og temperatur. Denne algoritmen er utviklet på grunnlag av 4 års driftsdata, mest sannsynlig fra døgnmiddel verdier. Bruk av "k3" kan

være egnet for hardt vann typer som i enkelte steder i England (Critcheley, 1990), men er ikke egnet for norske bløtt vann som krever pH korrigering. Dette systemet ble i 1993 solgt for ca. kr 600.000,-.

Et av problemene assosiert med oppbygging av empiriske modeller er datagrunnlaget. Ettersom det er god tilgjengelighet for automatisk registrering av måledata i store anlegg, er ikke oppbyggingen av en empirisk formel vanskelig. Når man bruker driftsdata fra et renseanlegg med fellingskjemikaliedoser som resulterte i god nok renseseffekt, betyr ikke dette at doseringen var optimal. Det kan også ha vært overdosering av fellingskjemikalier. En algoritme basert på slike data kan derfor være feilaktig (Watts, 1994). På grunn av dette man har brukt jar-test data for å bygge algoritmer. Da må man ta hensyn til de kjente forskjeller mellom jar-test og full-skala kjemisk felling.

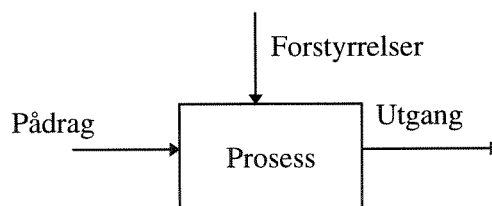
Det er gjort et forsøk i Norge for å bygge en empirisk modell for doseringsstyring i Høgskolen i Sogn og Fjordane (Husevåg *et al.*, 1994; Askeland *et al.*, 1995). Foreldrelige resultater har bekreftet potensialet. Problemene med måleutstyr har vært en hindring for videre utvikling. En eventuell bruk av konseptet i fullskala vil kreve tilpasning av modellen for hvert anlegg, noe som kan kreve ressurser og stor avhengighet i påliteligheten av måleutstyret.

4. REGULERINGSTEKNIKK SOM ET EFFEKTIV VERKTØY FOR OPTIMAL DOSERING



Figur 2: Vannbehandlingsanlegg

Hvis vi ser på et vannbehandlingsanlegg ut fra et systemteknisk synspunkt får vi følgende figur:



Figur 3: Systemteknisk struktur av vannbehandlingsprosessen

Prosessen består av alle delprosessene i vannbehandlingsanlegget; miksing, koagulering, sedimentering og filtrering. Variable som forstyrrer prosessen er råvannskvalitet (turbiditet, alkalitet, farge e.t.c) og mengde. Utgangen er det behandlede rentvannet.

Formålet med prosessen er at rentvannskvaliteten skal tilfredstille forbruker og myndighetenes krav til lavest mulig pris. Dette kan gjøres på prinsipielt to forskjellige måter; design av anlegget og optimal styring. (Prosess-design og styring må i større grad enn før koordineres for å få optimale prosesser, men denne problemstillingen behandles ikke videre her). Vi vil kun se på optimal styring i denne rapporten.

For å kunne kontrollere prosessen har man pådrag eller styringshandtak som påvirker prosessen. I vannbehandlingsanlegg er de viktigste pådragene for å styre vannkvaliteten dosering av fellingskjemikalie, alkali og klor. En tilfredstillende vannkvalitet er avhengig av at man har god kontroll med alle delprosesser, og i vannbehandlingsanlegg er dosering av fellingskjemikalie helt avgjørende. Etter dosering av kjemikalier har man få pådrag til å justere feil i doseringen.

Fellingskjemikaliet reagerer med urenheter i råvannet, og den kjemiske reaksjonen som skjer er så komplisert at en generell prosessmodell er vanskelig å finne. I tillegg karakteriseres

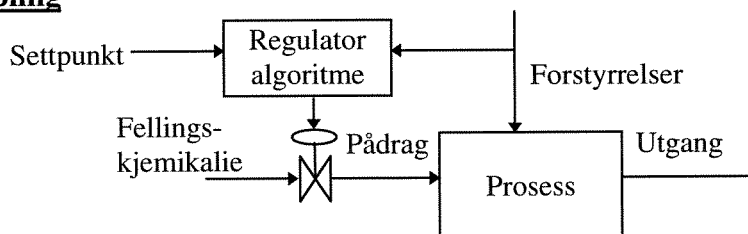
prossessen av lange tidsforsinkelser som gjør tilbakekoblede systemer vanskelig å implementere.

Konvensjonelle reguleringsmetoder baseres på en prosessmodell, og i mangel av en slik modell vil ikke reguleringen bli optimal.

4.1 Reguleringsstrukturer

Det finnes flere alternative strukturer man kan benytte seg av når man skal regulere en prosess. Det er vanlig i å dele opp i *foroverkoblede* og *tilbakekoblede* systemer.

4.1.1 Foroverkopling

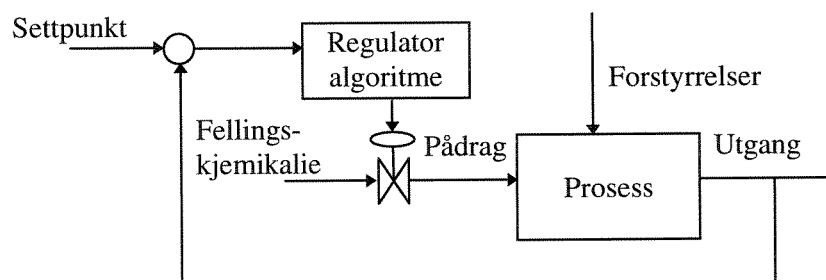


Figur 4: Foroverkopling fra forstyrrelsen

Foroverkopling benytter seg av en beregnet ligning eller algoritme for å forutsi optimal dosering. Algoritmen er basert på analyser av vannkvalitetsdata, f.eks ved jar-tester eller statistiske analyser. Foroverkopling benyttes når forstyrrelsene kan måles, samt at innvirkningen av forstyrrelsene på prosessen er kjent slik at en god regulatoralgoritme kan finnes. Forstyrrelser man kan måle på er f.eks fargetall, turbiditet, konduktivitet, pH, temperatur og mengde. Med en helt nøyaktig modell kan alle forstyrrelser kompenseres for og man oppnår perfekt regulering.

Denne metoden har sine fordeler at man får en momentan forandring av dosen og dermed unngår fluktasjoner i utgangen. Prosessen blir regulert før forstyrrelsene får noen innvirkning på utgangen. Et avvik fra ønsket verdi i utgangen vil ikke føre til endring av dosen noe som fører til et uønsket, konstant avvik.

4.1.2 Tilbakekopling



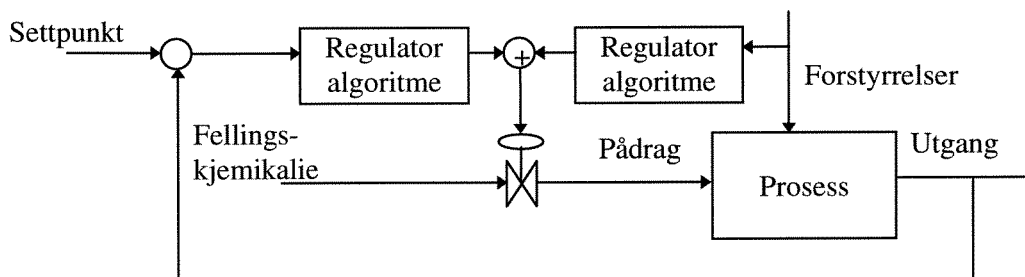
Figur 5: Tilbakekobling fra utgangen

Her blir fellingskjemikaliedosen bestemt ved at kvaliteten på det behandlede vannet blir sammenlignet med ønsket kvalitet. Dersom det er et avvik vil regulatoren kompensere for dette og man oppnår en nøyaktig regulering. Derimot vil ikke forstyrrelser på prosessen bli korrigert før utgangen registrerer et avvik fra ønsket verdi.

Den største vanskeligheten med tilbakekoblede systemer i vannbehandlingsanlegg er tidsforsinkelsene. Tidsforsinkelsen fra pådraget gjøres til resultatet kommer til utgangen er meget lang, og i tillegg variabel avhengig av belastning. Forsinkelsen gjør at doseringen vil bli beregnet på et 'gammelt' råvann. En løsning på dette kan være å måle rett etter doseringsstedet, f.eks ved streaming current detector eller en fnokk sensor. Problemet vil da være å finne det optimale settpunktet, noe som må bestemmes for hvert anlegg.

Vanligvis bestemmes settpunktet til reguleringssløyfer av operatører, en måte å bruke fuzzy logikk på er å la et fuzzy system bestemme disse settpunktene. Et eksempel på dette vil bli behandlet i § 5.2 (Itoh *et al.*, 1990).

4.1.3 Kombinasjon av forover- og tilbakekopling



Figur 6: Kombinert forover- og tilbakekopling

Denne kombinasjonen kombinerer egenskapene med begge strukturer, foroverkoplingen tar seg av forstyrrelsene mens tilbakekoplingen sikrer nøyaktigheten. Men fremdeles er tidsforsinkelsen et problem, samt at strukturen er komplisert, som kan gjøre implementering og vedlikehold vanskelig.

4.2 Regulatoralgoritmer

Alle reguleringsalgoritmer baseres på en modell av prosessen. Denne modellen kan være en fysisk modell, satt sammen av differensialligninger, en black box modell hvor man kun ser på inn-ut sammenhenger, eller en lingvistisk modell basert på ekspertkunnskap om prosessen.

4.2.1 Black box modeller

Dette er en type modeller som kopler observerte utganger til observerte innganger uten å forklare mekanismer internt i prosessen. Man kan skille mellom empiriske og nevrale nett:

- **Empiriske modeller**

Empiriske modeller baseres på forskjellige statistiske metoder for å finne inn-ut sammenhengene.

- **Nevrale nett**

Nevrale nett (NN) er inspirert av biologiske modeller av hjernen. Slike modeller kan modifisere sine utganger i respons til sine innganger, d.v.s. 'lære'. Nettverket blir opplært til å gi riktige utganger ved å presentere det med mange eksempler sammen med de riktige svarene. Ferdig opplært kan det nevrale nettet operere kun på inngangsverdiene, og beregne utgangen.

Fordeler med black-box modeller

- unngår problemer med fysisk modellering
- kjent teknologi (tildels riktig for nevrale nettverk)
- kontinuerlig oppgradering av modellen basert på nye målinger

Ulemper med black-box modeller

- trenger store datamengder
- må kalibreres for hver prosess
- lite fleksibel med hensyn til innføring av nye målinger
- dekker ikke operasjonsområder utenfor innsamlede datasett
- lineære sammenhenger mellom innganger (gjelder ikke for nevrale nettverk)
- ikke garantert at innsamlet data representerer prosessen
- lite transparent, i betydning at det er vanskelig å se fysiske sammenhenger mellom prosess og modell.
- utnytter ikke tilgjengelig prosesskunnskap
- utnytter ikke operatør erfaringer

4.2.2 Deterministiske modeller

Dersom man kan utvikle en matematisk modell som inneholder de viktigste fysiske, kjemiske og biologiske reaksjoner som foregår i en renseprosess kan modellen brukes til å designe modellbaserte regulatorer.

Alle prosesser er, i mer eller mindre grad, ulineære. De fleste modellbaserte metoder baseres på lineære modeller, eller lineariseringer av ulineære modeller. Dette er gyldig for mange prosesser som har svake ulineariteter. Dette er ikke tilfelle for vannbehandlingsanlegg hvor prosessen er preget av ulineære kjemiske og biologiske prosesser.

Fordeler med deterministiske modeller

- får økt kunnskap om prosessen
- kan brukes til simuleringer
- kan brukes til design av anlegg
- kan bruke modell-kunnskap fra andre tilsvarende prosesser

Ulemper med deterministiske modeller

- Svært tidkrevende (modellering, implementering, vedlikehold)
- Stort antall parameter som må kalibreres
- Utnytter ikke ekspertkunnskap i form av erfaringer
- Høy brukerterskel (krever meget høy kompetanse)
- Følsomme for unøyaktigheter i modellering
- Krever mye regnekraft

4.2.3 Fuzzy modeller

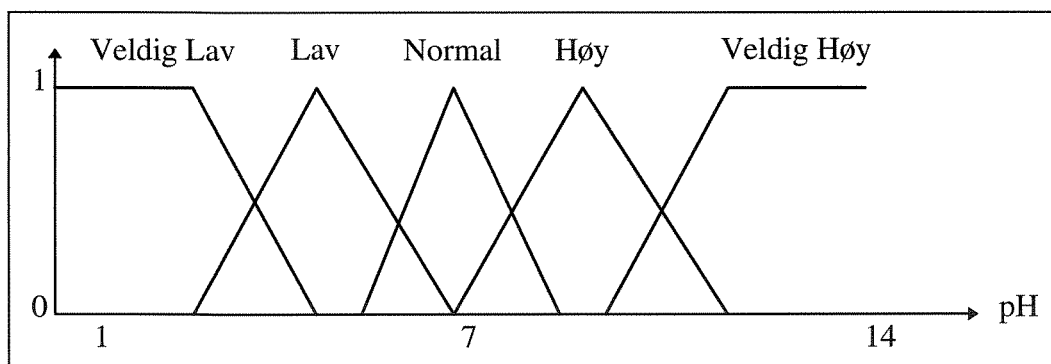
Kunnskap om sammenhenger i prosessen som vist i § 3.1 er vanskelig å modellere med matematiske ligninger. Fuzzy logikk tilbyr et rammeverk for hvordan man kan behandle ekspertkunnskap for å bygge opp regelbaser som kan brukes til å modellere prosessen i form av lingvistiske IF-THEN regler. Dette blir behandlet i neste kapittel.

5. FUZZY KONTROLL I VANNRENSING

5.1 Fuzzy kontroll - en introduksjon

Fuzzy kontroll bygger på definisjonen av fuzzy sett og fuzzy logikk som ble introdusert i 1965. Et fuzzy sett har, i motsetning til et klassisk (boolsk) sett, uskarpe grenser, med en glidende overgang mellom medlemskap og ikkemedlemskap. Dette gjenspeiler mer den virkelige verden hvor ting sjelden er sort eller hvit, men heller nyanser av grått imellom.

Fuzzy kontroll fyller et viktig hull i design av styringsalgoritmer som er oppstått mellom rent matematiske metoder, som f.eks lineære regulatorer, og logiske systemer, som f.eks ekspertsystemer. Mens andre metoder krever nøyaktige matematiske likninger for å modellere virkeligheten, kan fuzzy design takle motsigelser i menneskelig språk og logikk. Dette gir både en intuitiv metode for å beskrive systemer ved hjelp av menneskelige uttrykk og gir et grunnlag for å oversette kunnskap om systemet til effektiv styring og kontroll.



Figur 7: Eksempel på inndeling av pH-området i fuzzy sett.

Etter å ha valgt innganger og utganger for det fuzzy systemet, deler man disse inn i fuzzy sett. Et eksempel på dette er vist i Figur 7. Antall fuzzy sett man velger å dele inn i er et design spørsmål som bl.a. har innvirkning på nøyaktigheten. Når dette er gjort utvikles *regelverket*, eller *regelbasen*, som viser forholdet mellom inn og utganger og dermed inkluderer en lingvistisk beskrivelse av prosessen. Dette gjøres i form av kondisjonelle 'if-then' regler. Et eksempel på en regel for dosering av fellingskjemikalie i et avløpsrensaneanlegg kan være:

- **IF** pH er *høy* og PO₄-P er *høy* **THEN** sett dose til *høy*

For en erfaren operatør eller en ekspert på systemet er disse reglene lette å skrive, og man kan lage så mange regler som man vil for å beskrive systemet tilstrekkelig (selv om det vanligvis er nok med et moderat antall regler). Når målingene foreligger vil en eller flere av disse reglene slå til med varierende sannhetsgrad mellom 0 (usant) og 1 (sant). Den endelige beslutning blir en vektning av reglene slik at et entydig, numerisk signal blir sendt til utgangen, f.eks kjemikaliepumpe.

En av fordelene med fuzzy kontroll er dets enkelhet og fleksibilitet. Fuzzy kontroll kan takle problemer med unøyaktige og ufullstendige data, og det kan modellere ulineære funksjoner av vilkårlig kompleksitet.

Bruk av fuzzy kontroll passer godt for prosesser hvor man har:

- ufullstendig eller manglende modell av prosessen, og prosessen forandres over tid.
- prosessen er ulineær
- ekspertkunnskap om prosessen eksisterer

Dette er tilfelle i mange biologiske og kjemiske renseprosesser.

En regelbasert måte å løse problemer på, samt lingvistiske beskrivelser av systemet, gjør at det er relativt enkelt å designe fuzzy systemer. Samtidig blir løsningen enkel å forstå på tvers av fagretninger. Dette gjør det også enkelt å oppdatere og vedlikeholde systemet over tid.

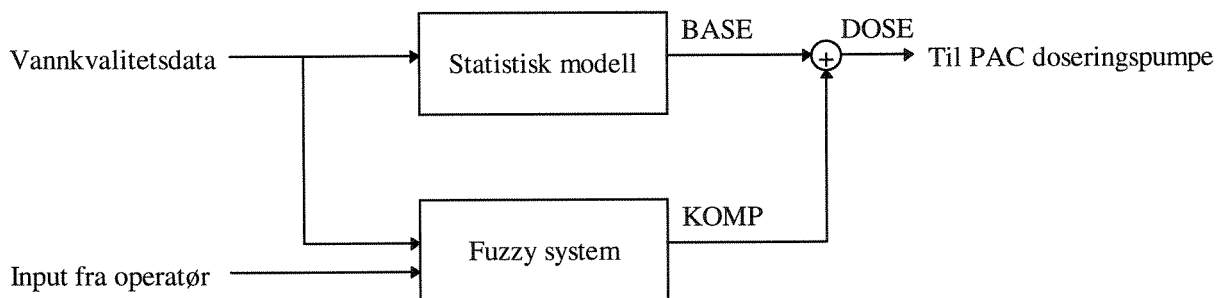
5.2 Applikasjoner med fuzzy styring: litteraturoversikt

Et litteratursøk ble utført i vannfaglige databaser (Aqualine, WatLitt, WRA og Polltex), i en database (CITE) som inneholder referanser til artikler med fuzzy teknologi og i en patent database (JAPIO).

Det finnes få publikasjoner og de som ble funnet var fra Japan. Dette behøver ikke å bety at bruk av fuzzy logikk ikke er aktuelt. Japanske artikler er vanskelig å få tak i på engelsk, og det er ikke usannsynlig at metodene er patenterte og dermed ikke blir offentligjort. Japan er et foregangsland innen bruk av fuzzy teknologi, spesielt med hensyn til å implementere teori til praktiske anvendelser. En annen årsak kan være tverrfagligheten mellom reguleringsteknikk, kjemiteknikk, miljøteknikk, og kunstig intelligens.

Yagashita et al., 1985

Yagashita et al., (1985) beskriver et styringssystem som benytter en kombinasjon av en statistisk modell og operatørinput som blir behandlet med fuzzy regler.



Figur 8: Fuzzy styringssystem. Fra [Yagashita et al., 1985]

Følgende input ble benyttet; turbiditet råvann, alkalinitet, vanntemperatur, turbiditet behandlet vann, økning i turbiditet, fnokkdannelse og oppstart.

Doseringen er summen av base-doseringen gitt av den statistiske modellen og kompensasjonen gitt av det fuzzy systemet.

Utfra intervjuer med operatører og felt-kjøringer kom de frem til en *regelbase* for det fuzzy systemet. Totalt brukte de 10 regler, et eksempel på en regel er:

IF TUI=SA AND ALK=SA AND TEMP=SA THEN KOMP=NM

Denne regelen kan også skrives som:

HVIS turbiditeten til råvannet er lav OG alkaliteten er lav OG temperaturen er lav,
SÅ skal man kompensere dosen medium negativt.

Systemet ble utprøvd på et full-skala vannbehandlingsanlegg og de konkluderer med at det fuzzy systemet i kombinasjon med en matematisk modell er like god som en erfaren operatørs instilling. Fordelen er at operatører blir mindre belastet, og at uerfarne operatører kan styre anleggene like godt som de mer erfarne operatører.

At denne metoden fremdeles brukes, men trolig i en forbedret utgave, finner vi i Kurotani *et al.*, (1995) hvor de sier: "Though approaches for switching the coagulant dosage expression or adjusting the rate, such as fuzzy control and neural control, are now implemented in order to achieve control as accurately as manual control by operator, they still require operator's help." I sin artikkel foreslår de bruken av en fnokk sensor kombinert med modell prediktiv kontroll slik at en tilbakekopling kan brukes, og dermed kan en helautomatisk prosessstyring implementeres.

Baba *et al.*, 1990

En kombinasjon av flere teknikker for fellingskjemikaliedosering, deriblant fuzzy logikk finner vi i Baba *et al.*, (1990). De foreslår et konsept 'Intelligent Operasjons Støtte', som består av fire domener; fysiske matematiske modeller, billed-behandlingsteknikker, fuzzy kontroll og nevrale nettverk (NN).

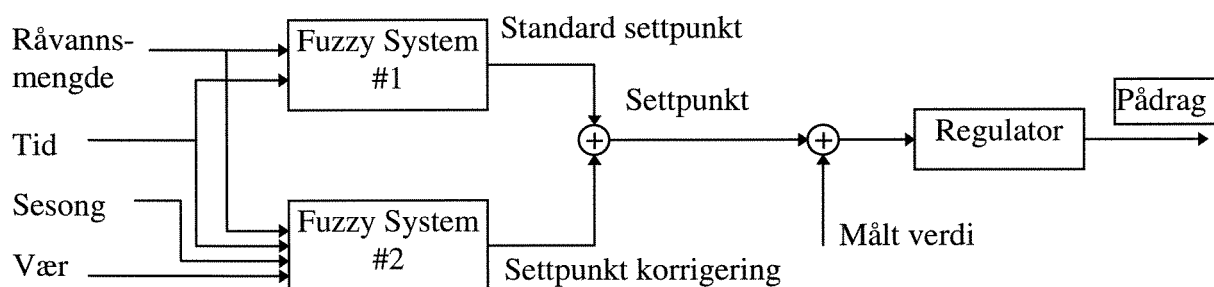
I denne artikkelen ser de bare på nevrale nettverk for prediktering av fellingskjemikaliedose. Opplæringen av det nevrale nettverket baserer seg på et års drift av erfarne operatører. Inngangene til nettverket er vannkvalitet (turbiditet, vann temperatur, alkalitet, pH og råvannsmengde) og bilde informasjon (flokk diameter, antall flokker, flokk formasjons volum, flokk tetthet og opplyst flokk intensitet).

De bruker ikke det opplærte NN til on-line styring, men det nevrale nettverket viser seg å ha bedre prediktive egenskaper sammenlignet med multi-variabel regresjonsmetoder, spesielt under abnormale forhold (f.eks kraftig regnvær).

Baba *et al.*, (1990) refererer til andre artikler som kun er tilgjengelig på japansk. Vi finner også indikasjoner på at fuzzy teknologi er brukt i vannbehandlingsanlegg: 'Knowledge Engineering (KE) and fuzzy control are well-known as conventional methods for solving these control problems' (Baba *et al.*, 1990). Her peker 'these problems' tilbake til problemer med å takle ukontrollerbare og ukjent tilstander i prosessen, samt store variasjoner i råvannsmengde og kvalitet.

Itoh et al., 1990

Fuzzy kontroll er også benyttet i andre prosesser i vannbehandlingsanlegg. Itoh *et al.*, (1990) bruker fuzzy kontroll for å dosere klor i pre-klorinering prosessen. Systemet tar hensyn til sesong, vær, tid på døgnet og innkommende vannstrøm. Systemet er delt i to uavhengige delsystemer som hver behandler to problemstillinger. System 1 tar seg av variasjoner i råvannsinntak og tid på dagen, mens system 2 korrigerer for eksterne forhold (sesong, vær, råvannsinntak og tid på dagen) som påvirker klor-forbrukere. Det endelige settpunktet til klor doserings-regulatoren er summen av de to delsystemene. Klor doserings-regulatoren er en vanlig, konvensjonell tilbakekoplings regulator. Totalt har systemet 47 regler, og eneste input som kreves fra operatøren er informasjon om været.



Figur 9: Grunnleggende struktur for fuzzy kontrollsystem. Fra Itoh *et al.*, (1990).

Det ble installert på Sagamihara vannbehandlingsanlegg, og det fuzzy kontroll systemets viste seg å være effektiv hvor:

- Fluktasjoner i residual klor ble redusert fra 0.6-1.6 mg/l til 0.4-1.0 mg/l. Dette stabiliserer desinfeksjonsprosessen.
- Operatører er mindre belastet enn før, og utrenede operatører styrer anlegget like bra som erfarne operatører.

Også her har de referanser til andre artikler som kun er tilgjengelig på japansk.

Askeland et al., 1995

En fuzzy regulatorer basert på måling av forstyrrelser (foroverkopling) er blitt implementert i et pilot vannbehandlingsanlegg av Askeland *et al.*, (1995). De har en designet en fuzzy regulatorer basert på input av fargetall, turbiditet og pH i råvannet. Utgangen var signal til doseringspumpe av fellingskjemikalie. De brukte ingen tilbakekopling. Regelbasen ble satt opp etterhvert som de fikk kjennskap til anlegget. Flere kjøring i pilot-anlegget viste at den fuzzy regulatoren klarte å takle variasjoner i råvannskvalitet meget godt. Selvom råvannet's fargetall (mg-Pt/l) varierte fra ca. 20 til 80 viste det rensede vannet verdier på under 5.

5.4 Patentsøk

Det ble utført et patentsøk i den japanske patent database, søkekriteriet var: fuzzy AND water AND treatment. Det gav 23 treff, hvorav 13 handlet om avløpsrensning, 1 om flokkulant-dosering og resten var ikke aktuelle.

Tomohisha, K., 1992

Patentet beskriver et system som automatisk doserer flokkulant basert på pH og turbiditet av det behandlede vannet. pH og turbiditet deles opp i fuzzy sett, og på grunnlag av regelbasen beregnes dosen. Systemet er hel-automatisk og er ikke avhengig av operatør hjelp. Om målingene tas direkte etter dosering eller av ferdigbehandlet vann er ikke beskrevet. (Se også vedlegg A).

Patenter med bruk av fuzzy innenfor avløpsrensing

Som tidligere nevnt ble det også funnet 13 patenter som omhandlet avløpsrensing i den japanske databasen. Vi vil bare her liste opp noen av titlene uten å gå nærmere inn på de enkelte patenter.

- "Apparatus for controlling sludge quantity in active sludge process."
- "Sludge amount control device for active sludge process."
- "Controller for optimizing activated sludge process."
- "Controlling device for sludge amount in activated sludge process."
- "Controlling method for biological denitrification."
- "Initial setting sludge extraction controller by fuzzy inference."
- "Apparatus for controlling quantity of sludge."
- "Water quality controller for activated sludge process."
- "Dissolved oxygen concentration control apparatus."

De fleste patentene behandler problemer i aktiv slam-anlegg, f.eks optimalt slamteppe, resirkulasjonsrate av slam, lufting o.s.v.

5.5 Eksempler på bruk av fuzzy kontroll i andre prosesser

Under litteratursøket på bruk av fuzzy styring av drikkevannrensing kom det frem en rekke artikler som omhandler bruk av fuzzy teknologi i avløpsrensing, og her var det flere europeiske artikler også. Spesielt Tyskland er langt fremme på bruk av fuzzy i forskjellige renseprosesser. Hansen *et al.* (1994) bruker fuzzy kontroll for lufting i aktiv slam-anlegg. De konkluderer med at fuzzy systemet virker like bra som et konvensjonelt system under normale betingelser, men bedre under ekstreme, uforutsette forhold. Boscolo *et al.*, (1993) har prøvd ut fuzzy kontroll på et anarob reaktor i et pilot-anlegg. De konkluderer med at kontroll basert på fuzzy logikk er mulig. En artikkel av Alex og Jumar, (1994) om fuzzy kontroll i kommunale avløpsrensing er ikke vurdert. Fra Taiwan finner vi et eksempel på bruk av fuzzy regulator i aktiv slam-anlegg av Tsai *et al.*, (1994). I Japan har vi også en applikasjon i biologiske renseanlegg for styring av ammonium av Aoi *et al.*, (1992). Systemet reagerte raskt i respons til last forandringer, og gav god nitrogenfjerning og stabil drift.

Listen over industrielle applikasjoner er lang. Et klassisk eksempel er automatisk styring og kontroll av sementovner som før ble gjort manuelt (Larsen, 1980). Følgende liste av applikasjoner ble funnet i (University of Linz, 1995):

- Automatisk kontroll av sluseporter i vannkraft-verk (Tokyo Electric Pow.)
- Forenklet kontroll av roboter (Hirota, Fuji Electric, Toshiba, Omron)
- Innstilling av kameraposisjon for dekning av sportsarrangementer (Omron)
- Erstatning av en ekspert for evaluering av aksjemarked aktiviteter (Yamaichi, Hitachi)
- Forhindring av uønskede temperatur fluktasjoner i luft-kondisjonerings systemer (Mitsubishi, Sharp)
- Effektiv og stabil kontroll av bil-motorer (Nissan)
- Cruise-kontroll for biler (Nissan, Subaru)
- Forbedret effektivitet og optimal funksjonalitet av industrielle kontroll applikasjoner (Apronix, Omron, Meiden, Sha, Micom, Mitsubishi, Nisshin-Denki, Oku-Electronics)
- Optimal planlegging av buss-tid tabeller (Toshiba, Nippon-System, Keihan-Express)
- Arkiv system for dokumenter (Mitsubishi Elec.)
- Prediksjon av jordskjelv (Inst. of Seismology Bureau of Metrology, Japan)
- Kreftdiagnose system (Kawasaki Medical School)
- Kombinasjon av fuzzy logikk og nevralt nettverk (Matsushita)
- Skriftgjenkjenning på lomme computere. (Sony)
- Gjenkjenning av motiver i bilder med video kameraer (Canon, Minolta)
- Automatisk motor-kontroll for støvsugere med gjenkjenning av gulv-overflate og grad av skittenhet. (Matsushita)
- Motlys kontroll for videokameraer (Sanyo)
- Kompensasjon mot vibrasjoner i videokameraer (Matsushita)
- En-knapps kontroll av vaskemaskiner (Matsushita, Hitachi)
- Automatisk, selvstyrt helikopter (Sugeno)
- Kontroll av hastighet og temperatur av maskiner i stål-verk (Kawasaki Steel, New-Nippon Steel, NKK)
- Kontroll av undergrunnsbaner for å forbedre komfort, stopp nøyaktighet og elektrisk forbruk (Hitachi)
- Forbedret drivstoff-forbruk i biler (NOK, Nippon Denki Tools)
- Forbedret sensitivitet og effektivitet for heis kontroll (Fujitec, Hitachi, Toshiba)
- Forbedret sikkerhet for kjernekraft-reaktorer. (Hitachi, Bernard, Nuclear Fuel div.)

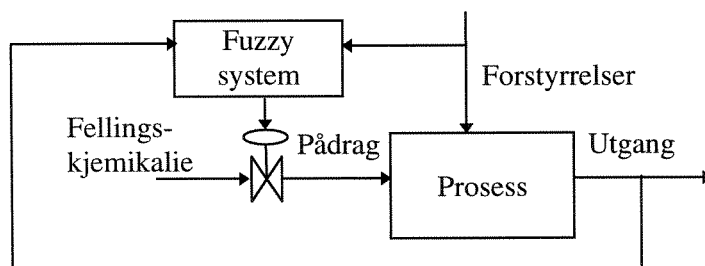
Alle de ovenstående eksempler er fra Japan, men det finnes tilsvarende lister for implementering i Europa, om ikke over et så vidt område. I 1992 var markedet for fuzzy applikasjoner i Japan på ca 2 Mrd US\$. (Cox, 1995)

I avløpsrensaneanlegg finnes det minst ett kommersielt tilgjengelig produkt (i Europa) som benytter seg av fuzzy logikk for kjemikaliedosering, Dulcometer Phosphate 50, som i 1994 var installert i 12 avløpsrensaneanlegg (Bulgin, 1994). Reduksjon oppmot 40 % i kjemikaliedosering er oppnådd (Bulgin, 1994). Se Figur 10.

Avløpsrensaneanlegg og vannbehandlingsanlegg har, fra et reguleringsteknisk synspunkt, mange av de samme problemene. Det skulle derfor være mulig å benytte samme teknologi for prosessstyring på begge typer anlegg.

6. FORESLÅTT FUZZY SYSTEM

6.1 On-line fuzzy system



Figur 11: Fuzzy system

En erfaren operatør ser både på råvannskvalitet, behandlet vannkvalitet og andre mellomprosesser, og justererer dosen etter å sammenstille informasjonen basert på personlig erfaring. Operatøren benytter seg av all tilgjengelig informasjon i form av en lingvistisk modell av prosessen. Et fuzzy system kan omsette denne kunnskapen til logiske regler, og styre prosessen automatisk.

Det største problemet ved tilbakekopling uansett hvilken struktur man benytter seg av er den lange, variable tidsforsinkelsen. Dette gjør utvikling av en foroverbasert metode samt en tilbakekopling tidlig i prosessen viktig. Valg av måleparametere og målested er viktige faktorer som må tas hensyn til om et suksessfullt styringssystem skal fungere.

6.2 Beslutningstøtte for operatører

Problemer i små vannbehandlingsanlegg blir ofte ignorert siden operatører ikke har erfaring eller nødvendige ferdigheter for å diagnostisere problemene og foreslå løsninger. Manglende midler til å innkalle eksterne konsulenter er også et problem.

Det finnes idag mye empirisk kunnskap om vannrensprosesser som kunne vært utnyttet til opplæring og forbedret styring av vannrensanlegg. En løsning på å lære opp operatører og veilede til problemløsning er å lage et ekspertsystem. Et slik beslutningstøtte system er beskrevet i Collins *et al.* (1991). Her fokuserer de på analyse av jar-tester. Et eksempel på en dialog mellom operatør og systemet er som følger:

Operatør: "Jeg har et problem med høy turbiditet."

System: "O.K. Hva er zeta potensialet ?"

Operatør: "-5."

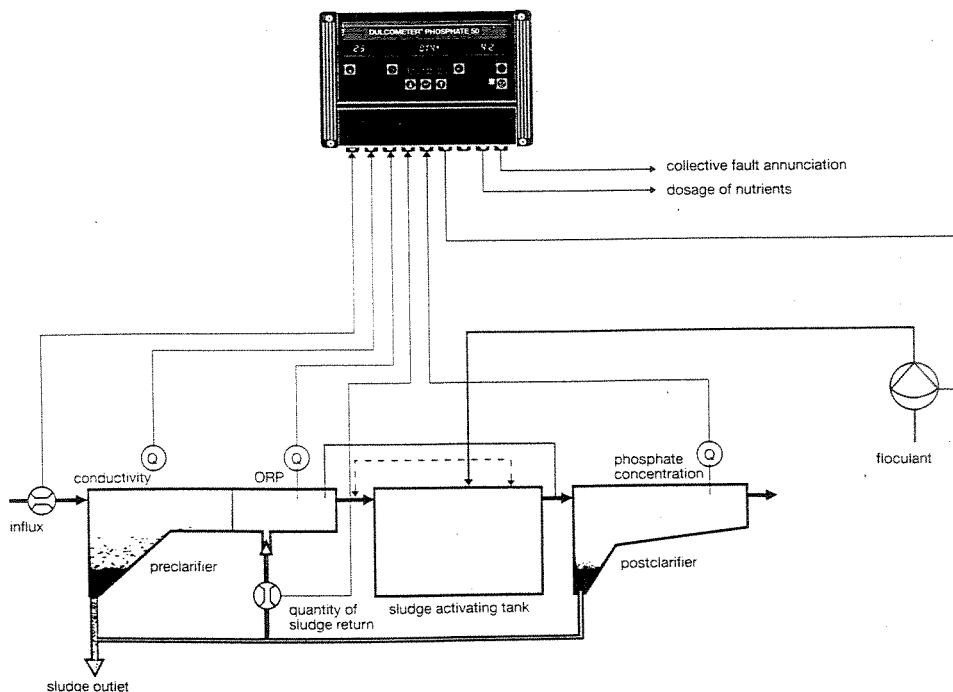
System: "Hvordan ser fnokkene ut ?"

Operatør: "Mikrofnokker"

System: "Min konklusjon er -- Fellingskjemikaliedose er normal. Øk polymer dose."

Operatør: "Hvordan kom du frem til svaret ?"

System: "Ved regel 4: HVIS zetapotentialet er i intervallet -10 til 0 OG turbiditet er høy OG fnokkene er mikrofnokker, SÅ er fellingskjemikaliedose normal OG polyerdose er for lav"



Figur 10: Skjematisk diagram av avløpsrenseanlegg som viser input-variable for fuzzy logikk regulator (Bulgin, 1994)

Et fuzzy system kan også ses på som et expertsystem. Fordelen med et fuzzy expertsystem kontra et konvensjonelt expertsystem er hvordan konklusjonen på et problem finnes.

Konvensjonelle ekspertssystemer baserer seg på tradisjonell logikk hvor en hendelse enten er sann eller usann. Dette medfører at kun én konklusjon på et problem kan være sann, mens det i virkeligheten egentlig er en kombinasjon av flere konklusjoner.

Et fuzzy expertsystem håndterer dette på en elegant måte. Reglene i regelbasen slår til med varierende sannhetsgrad, og resultatet blir en avveining mellom konklusjonene.

6.3 Forventede fordeler med bruk av fuzzy kontroll i vannrensing

Først vil vi trekke frem fordeler man vil oppnå ved forbedret styring av vannrenseanlegg. Disse fordelene vil være uavhengig av hvilket system man implementerer. Etterpå beskriver vi hvilke spesielle fordeler bruk av fuzzy teknologi kan gi over andre alternative metoder.

6.3.1 Generelle fordeler

- konsistent, forbedret vannkvalitet
- optimal utnyttelse av ressursbruk (kjemikaliedosering, slamproduksjon, mann-timer)
- driftsstabilitet
 - mindre forbruk av fellingsmiddel
 - lavere restkonsentrasjoner av aluminium/jern i rensset vann
 - lavt forbruk av andre kjemikalier (lut, karbondioksid, etc)
 - optimal pH under fellingsprosessen
 - lengre filtreringssyklus
 - håndtering av variasjoner i råvannskvalitet
 - håndtering av nødsituasjoner
 - mindre slamproduksjon
 - lavere driftskostnader generelt

6.3.2 Fordeler ved bruk av fuzzy teknologi

- enkelt å forstå for operatører og brukere
- robust kontroll
- fleksibelt (modifisering av regelbase, utvidelse av målinger)
- er ikke så sensitiv mot feil måleverdier som konvensjonelle metoder
- enklere å bygge opp enn en annen empirisk modell og mere intuitiv
- kan operatør- og forknings-kunnskaper om prosessen integreres i systemet
- er ikke avhengig av store database med prosessresultater
- enklere tilpassning (kalibrering) for anlegg
- velegnet for små vannverk såvel som for store vannverk
- kan fungere som opplæringsverktøy, beslutningsstøtte verktøy i tillegg til on-line styring.
- kan kombinere flere ulike metoder (black-boks, nevrale nett, matematiske modeller)
- samme regelbase kan benyttes på flere anlegg
- kan innføre ny kunnskap til regelbase etterhvert som kunnskapen øker

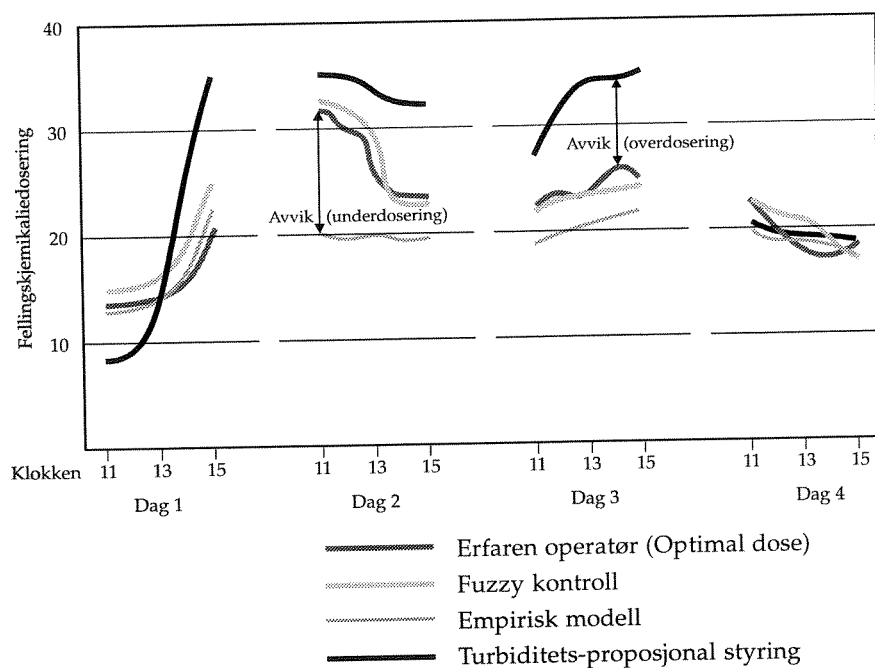
6.3.3 Ulemper ved bruk av fuzzy teknologi

- Systemet blir ikke bedre enn eksperten som formulerer reglene
- Regelbasen kan bli stor og uhåndterlig
- Ingen formalisert design metodikk
- Systemet har ingen læring utover det man selv putter inn i systemet

6.3.4 Kvantifisering av fordeler

Foreløpig eksisterer ikke en løsning tilsvarende til den som er beskrevet ovenfor (§ 6.1 og §6.2). Derfor er det vanskelig å dokumentere en kvantitativ fordel ved bruk av fuzzy system i vannrensing. Likevel ønsker vi å nevne følgende kvantitative data som finnes i litteraturen om innføring av forbedrede kontroll og styringsmetoder:

- Bruk av streaming current detector har resultert i 24% besparelse av kjemikalieforbruk i engelske vannrenseanlegg (Critchely, et.al., 1990)
- Bruk av partikkelinnhold-proporsjonal dosering istedet for mengdeproporsjonal dosering i Nynesand kloakk renseanlegg i Sverige har resultert i 20% kjemikaliebesparelse (Kemira, 1995). Fuzzy system kan med fordel brukes her.
- I avløpsrenseanlegg har en med bruk av fuzzy oppnådd opptil 40% besparelse av kjemikalier, se § 5.5. (Bulgin, 1994). Fuzzy system vil kunne øke fordelene.
- Figur 12 illustrerer at bruk av et fuzzy styringssystem ga tilnærmet samme dosering som en erfaren operatør. Både turbiditets-proporsjonal styring og bruk av bare statistisk modell ga doseringer som avvek betydelig fra doseringen operatøren faktisk benyttet.
- Rest aluminium i rensert vann kan holdes på et minimum ved innføring av en overordnet fuzzy system basert på bruk av rentvann analyser (direkte eller indirekte måling av aluminium).
- Et overordnet fuzzy system kan håndtere flere delprosesser i direkte-filtreringsprosessen som kan resultere i betydelige besparelse i flere trinn.



Figur 12.: Dosering styring basert på fuzzy system, empirisk modell, turbiditetsproporsjonal og en erfaren operatør (Yagishata et.al., 1985).

7 KONKLUSJONER

- Fokuseringen på kjemisk vannrensing vil bli økt med de nye vannforskriftene i Norge. Krav til prosessstabilitet, rensegrad, rest kjemikalier og økonomi vil øke med tiden. Sanntids prosessstyring vil være den eneste konkurrerbare metoden i fremtiden.
- Kjemisk felling er en meget komplisert prosess og det eksisterer ikke en fullstendig matematisk beskrivelse av prosessen. Kun endringer i enkelte parametre er vel beskrevet matematisk. Likevel eksisterer det en betydelige prosesskunnskap hos forskere og driftsoperatører.
- Fuzzy logikk tilbyr et rammeverk for integrering av informasjon fra operatører, ekspertkunnskap, "black box" modeller og matematiske modeller for å konstruere styringsmetoder for sanntidsstyring av vannrenseanlegg.
- Fuzzy systemer er enkle å forstå for operatører og brukere, og systemene er robuste og fleksible.
- Litteratursøk viser at veldig få applikasjoner eksisterer med fuzzy kontroll innen vannbehandling, og de som finnes hovedsakelig er i Japan.
- Kvantitative fordeler er vanskelig å dokumentere, men litteratur viser til muligheten for å redusere kjemikalieforbruket. Reduksjonen vil være avhengig av anleggstype og størrelse.
- Fuzzy kontroll kan brukes for overordnet styring av alle del prosessene i et vannverk inklusiv fellingskjemikaliedosering, CO₂/lut dosering, filtrering etc.
- Fuzzy kontroll system kan simulere en erfaren operatør som manuelt optimaliserer prosessen til enhver tid, og dermed kan være vel egnet for små vannverk så vel som for store vannverk.
- Fuzzy logikk kan brukes i et brukerstøtte- og opplæringsprogram for operatører.

REFERANSER

- Alex, J. og Jumar, U. (1994): 'Fuzzy control approach to municipal waste water treatment plants.' I 'Proceedings of 2nd European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing', Aachen, Germany. p. 128-132.
- Aoi, T., Okaniwa, Y., Hagiwara, K., Motomura, K., Iwaihara, E., Imai, M., Serizawa, Y. (1992): 'A direct ammonium control system using fuzzy inference in a high-load biological denitrification process treating collected human excreta.' *Wat.Sci.Tech.* Vol. 26, No. 5 & 6, pages 1325-1334.
- Askeland, R., Iversen, T., Sture, Å. og Vallestad, H. (1995). 'Utvikling av styre-system for kjemikaliedosering i vannrensaneanlegg.' Hovedoppgave, nr 12/95. Høgskulen i Sogn og Fjordane, Avdeling for ingeniørutdanning.
- Aztec (1993): The Aztec Intelligent Automatic Coagulation Control System, Issue 3, Part. No: 04-0070-A.
- Baba, K., Yoda, M., Ichika, H. and Osumi, A. (1988): A floc monitoring system with image processing for water purification plants. *Wat. Supply*, **8**. s. 323-327.
- Baba, K., Enbutu, I., Matuzaki, H., Nogita, S. (1990): 'Intelligent Support System for Water and Sewage Treatment Plant Which Includes a Past History Learning Function--Coagulant Injection Guidance System Using Neuralnet Algorithm.' I 'Proceedings of the 5th IAWPRC Workshop held in Yokohama and Kyoto, Japan.' Pergamon Press, New York. pp. 227-234.
- Boscolo, A., Mangiavacchi, C., Drius, F., Rongione, F., Pavan, P., Cecchi, F. (1993): 'Fuzzy control of an anaerobic digester for the treatment of the organic fraction of municipal solid waste (MSW).' *Wat.Sci.Tech.* Vol. 27, No. 2, pages 57-68.
- Bulgin, D. (1994): 'Phosphate removal techniques and fuzzy logic'. *W&WT*, february 1994. p.22-24.
- Collins, A.G., Searleman, J., Collins, K.J. (1991): 'Aspects of Intelligent Tutoring Systems Applied to Small Water Treatment Plant Expert Systems.' *Wat.Sci.Tech.*, Vol. 24, No. 6, s 307-314.
- Cox, E. (1995): Intervju med Earl Cox om bruk av fuzzy logikk i U.S.A. Funnet på WWW. URL: <http://darwin1.ucsd.edu:8000/connect/articles/success/logic.html>
- Critchley, R.F., Smith, E.O. and Pettit, P. (1990). 'Automatic ccoagulant control at Water Treatment plants in the North-West Region of England.' *J. IWEM*, **4**. s. 535-543.
- Culp, G.L. and Culp, R.L. (1974): New concepts in water purification. Van Nostrand Reinhold. New York. p 109.
- Dentel, S.K., (1991): 'Coagulant Control in Water Treatment.' *Critical Reviews in Env. Control*, **21**, (1), s. 41-135.
- Gregory, J. (1985): Turbidity fluctuations in flowing suspensions. *J. Coll. Interf. Sci.*, **105**, **2**, p 357.
- Hansen, J., Krauss, M., Buchholz, N. (1994): 'Initial experience with a fuzzy logic control system for optimizing nitrogen removal at a municipal sewage treatment plant.' *Abwassertechnik*. 45, no. 5, 35-38.
- Husevåg, H.M., Juvik, B. og Bringeland, J. (1994): 'Renseanlegg for drikkevann.' Hovedoppgave, nr 03/94. Høgskulen i Sogn og Fjordane, Avdeling for ingeniørutdanning.
- Itoh, O., Tanaka, Y., Inagaki, Y. (1990). "Fuzzy Control System for Pre-Chlorination at Sagamihara Water Purification Plant." *Instrumentation, Control and Automation of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems*. I 'Proceedings of the 5th IAWPRC Workshop held in Yokohama and Kyoto, Japan.' Pergamon Press, New York. pp. 259-264.

- IWSA. (1994). 'Optimal Dosing of Coagulants and Flocculants'. Proceedings of the IWSA-IAWQ Joint Specialist Group on Coagulation, Flocculation, Filtration, Sedimentation and Flotation in Water and Wastewater Treatment. Workshop January Mülheim an der Ruhr, Germany.
- Johansen, T.A. (1994). 'Operating regime based process modeling and identification.' Dr.Ing avhandling 1994:117. NTH, Institutt for teknisk kybernetikk, Trondheim.
- Kemira (1995): personlig kommunikasjon
- Kurotani, K., Kubota, M., Zaitu, Y., Ohto, T., Inoue, K., Nakayama, T., Itoh, H., Tambo, N., Matsui, Y. (1995). 'Advanced control of coagulation process by applying a floc sensor'. *Water Supply*, Vol 13, Nos 3/4, Osaka, pp. 239-244.
- Larsen, P.M.(1980): "Industrial application of fuzzy logic control." *Intl.J. Man.Macc.Studies*, 12, pp. 3-10
- Lingsten, L. (1984): 'Rutineunderøkelser i Glomma i Østfold 1983'. NIVA rapport O-8000222
- Storhaug, R. (1994): Personlig kommunikasjon
- Tsai, YP., Ouyang, CF., Wu, MY., Chiang, WL. (1994): ' Fuzzy control of a dynamic activated sludge process for the forecast and control of effluent suspended solid concentration.' *Wat.Sci.Tech.* Vol. 28, No. 11 & 12, pages 355-367.
- University of Linz. (1995): Liste over applikasjoner med fuzzy logikk. Funnet på WWW. URL: http://www.flll.uni-linz.ac.at/fuzzy/fuzzy_appl.10.html
- Watts, M. (1994): 'Coagulant Dose Control in the UK.' I 'Berichte aus dem Rheinisch-Westfälischen Inst. für Wasserchemie und Wassertechnologie GmbH', Band 10, Mülheim an der Ruhr, ISSN 0941-0961, s. 47-51.
- Yagashita, O., Itoh, O., Sugeno, M. (1985). 'Application of fuzzy reasoning to the water purification process.' In 'Industrial applications of fuzzy control', M.Sugeno (ed.), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), pp. 19-39.

VEDLEGG

A. Resultat av patentsøk

FLOCCULATING AND FILTRATION TANK FOR WATER TREATMENT

PUB. NO.: 04-305206 [JP 4305206 A]

PUBLISHED: October 28, 1992 (19921028)

INVENTOR(s): KUSAKABE TOMOHISA

APPLICANT(s): TOYOTA MOTOR CORP [000320] (A Japanese Company or Corporation), JP (Japan)

APPL. NO.: 03-096410 [JP 9196410]

FILED: April 01, 1991 (19910401)

INTL CLASS: [5] B01D-021/30; C02F-001/52; G05B-013/02

JAPIO CLASS: 24.3 (CHEMICAL ENGINEERING -- Mixing, Separation & Chrushing)
; 22.3 (MACHINERY -- Control & Regulation); 26.2
(TRANSPORTATION -- Motor Vehicles)

JAPIO KEYWORD:R131 (INFORMATION PROCESSING -- Microcomputers & Microprocessors)

JOURNAL: Section: C, Section No. 1036, Vol. 17, No. 131, Pg. 10, March 18, 1993 (19930318)

ABSTRACT

PURPOSE: To provide a flocculating and filtration tank for water treatment by which treated water of the desired water quality is stably obtained without the need of controlling the injected quantity of a focculant by an operator because of the injected quantity of the flocculant into raw water being automatically controlled.

CONSTITUTION: A pH signal SP and a turbidity signal ST representing pH and turbidity of treated water 16 respectively are supplied to a controller 38. A control loop which is previously determined so that the injected quantity of a flocculant 26 suitable for pH and turbidity of the treated water 16 may be determined by the controller 39 including a membership function having pH and turbidity of the treated water 16 as parameter is operated based on fuzzy inference to determine the injected quantity of the flocculant 26 and simultaneously to operate a flow control valve 28 so that the injected quantity thus determined may be attained.

Norsk institutt for vannforskning

Postboks 173 Kjelsås
0411 Oslo

Telefon: 22 18 51 00
Telefax: 22 18 52 00

Ved bestilling av rapporten,
oppgi løpenummer 3393-96

ISBN 82-577-2924-8