



---

Sveriges  
lantbruksuniversitet

# Fläktstyrd sluten strängkompostering

Covered windrow composting using fan control

---

Martin Lindström

# Referat

## Fläktstyrd sluten strängkompostering

*Martin Lindström*

På Hovgårdens avfallsanläggning tillämpas sluten kompostering för hushållsavfall. Komposten läggs upp i strängar och på dem placeras ett perforerat rör som är kopplad till en fläkt. Fläkten förser komposten med syre och håller samtidigt ner temperaturen. Luften sugas in underst i komposten och transporteras genom hela komposten och ut genom det perforerade röret.

Kompostprocessen genomgår tre faser, initial- högaktiv- och mognadsfas, under vilka olika mikrobiella aktiviteter sker. För att få en bra kompostprocess med hög nedbrytningsaktivitet är det önskvärt att temperaturen hålls under 40 grader när pH är lägre än 6. När pH har stigit ska temperaturen inte överstiga 70 grader för att undvika hämningar i processen.

I denna studie undersöks om det går att styra fläktarna så att energi kan besparas och att en bra kompostprocess bibehålls. Fläktarna styrs med ett styrprogram skrivet i Matlab.

Var tionde minut samplas ett temperaturvärde till kontrollprogrammet och jämförs med ett givet referensvärde. Temperaturen återkopplas och en PID-regulator skickar en signal till ett relä kopplat till fläktens manöverström. En temperatursensor placeras nära luftröret där temperaturen är som högst och kopplas till datorn. Fläkten kommer att stängas av och på beroende på styrsignalen. En minimumtid på 10 procent av samplingstiden (10 minuter) säkerställer att det inte blir anaeroba förhållanden i komposten.

Tre strängar undersöktes med olika referensvärden. Den första strängen hade ett initialt referensvärde på 37 grader och ställdes om till 65 grader då pH i komposten steg över 6. Den andra strängen hade ett konstant referensvärde på 65 grader och den tredje strängen styrdes inte alls utan användes som referens för de andra två.

Resultatet visar att alla tre strängarna hade ungefär samma koldioxidavgång vilket direkt kan relateras till nedbrytningen. Slutsatsen är att använda ett konstant referensvärde under senare delen av processen då en sådan styrning spar in på elförbrukningen.

Nyckelord: Kompostering, fläktstyrning, avfall

Institutionen för energi och teknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Box 7032, SE-750 07  
Uppsala  
ISSN 1401-5765

## **Abstract**

### **Covered windrow composting using fan control**

*Martin Lindström*

Covered composting is used for household waste in Hovgården, a waste treatment plant. The compost material is piled up in windrows and on top of them a perforated air pipe is placed. The compost is then covered with a plastic cover and the air pipe is connected to a fan. The fan not only provides the compost with oxygen, it keeps the temperature down. The air is sucked from underneath the windrow and is transported throughout the compost and out through the pipe.

The compost process has the phases that occur after one another. First is the initial phase, then the high-activity phase and at last the curing phase. During these phases different activities by microorganisms occur. To achieve a good composting process with a high degradation rate it is desirable to have a low temperature (below 40 °C) when pH is low (below 6). When pH rises the temperature should not increase to over 70 °C. If this is not the case then the process will be slowed down.

In this thesis it was investigated if it is possible to save energy by controlling the fans, and at the same time keep a good composting process. The fans are controlled by a program written in Matlab.

Every ten minutes a temperature value was sampled to the control program and was compared to the reference value. The feed-back control sends out a signal to a relay that is connected to the fan. A temperature sensor situated at a hot spot in the compost was connected to the program. The fan will be turned on or off due to the control signal. A minimum fan time were set to ten percent of the sample time (10 min) to make sure that the compost would not be anaerobic.

Three windrows with different reference values were examined. The first windrow had a initial reference value of 37 °C and were manually changed to 65 °C when pH rised. The second windrow had a constant reference value of 65 °C and the third windrow was not controlled and instead used as a reference for the first two windrows.

The result showed that there was no significant difference in carbondioxid production between the windrows, which is an indicator for the decomposition rate. The fan could not manage to keep the temperature down in the beginning and in some cases it could not even keep the temperature below 70 °C. The conclusion is to use a control strategy with constant reference value during the later part of the process since that can save electricity.

Keyword: Composting, aeration control

Department of energy and technology, Swedish University of Agricultural Sciences, Box 7032, SE-750 07 Uppsala, ISSN 1401-5765

## Förord

Examensarbetet har utförts inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och omfattar 30 hp. Arbetet har genomförts på institutionen för energi och teknik, SLU med handledning av Sven Smårs. Ämnesgranskare var Cecilia Sundberg, institutionen för energi och teknik, SLU.

Jag skulle vilja tacka:

- Sven Smårs för hans hjälp och engagemang under hela utförandet
- Cecilia Sundberg för hjälp med att få rapporten klar
- Johan Laurell som var initiativtagare till examensarbetet
- Evgheni Ermolaev för att jag fått använda mig av dina resultat och för all den hjälp du bidragit med både ute på Hovgården och på institutionen
- Francesco Agostini för att jag fått använda mig av dina figurer
- Personalen på Hovgården, speciellt riktat till Arne Alex och Tomas Ivarsson

Copyright © Martin Lindström och Institutionen för energi och teknik,  
Sveriges Lantbruksuniversitet.

UPTEC W 09 021, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2009.

## **Populärvetenskaplig sammanfattning**

Kompostering är en gammal metod att tillvarata hushålls- och trädgårdsavfall och används för att bryta ned avfallet så att det minskar i omfång och inte luktar illa. Eftersom inte alla kan kompostera hemma så bedrivs storskalig kompostering, bland annat på Hovgårdens avfallsanläggning utanför Uppsala. Där blandas avfall med strukturmaterial och redan mogen kompost för att komposten ska bli mer luftig och för att tillföra kulturer av mikroorganismer. Det finns en hel vetenskap bakom komposteringsprocessen och mikroorganismerna är en viktig del av denna. Det är dessa mikroskopiska djur som bryter ned komposten genom att äta upp substratet i högarna. Det finns olika typer av mikroorganismer som trivs i olika typer av miljöer. Vissa vill ha det varmt medan andra dör när temperaturen stiger för högt.

Det är mikrobernas aktivitet som gör att det blir varmt i komposten. Temperaturen kan stiga över 70 grader om ingen luftning sker. Vid sådana temperaturer klarar inte mikroberna av att leva längre och kompostprocessen hämmas. Surt material är inte heller bra utan mikroorganismerna trivs som bäst när pH stiger mot det neutrala. Man säger att på ett gram jord finns det en miljard mikroorganismer. När dessa äter det som finns i komposten så ökar deras aktivitet och de fortplantar sig. Precis som människan måste de andas för att klara sig och i utandningsluften finns koldioxid. Därför är koldioxidavgången från komposten ett mått på hur mycket mikroorganismerna jobbar. Mycket koldioxid indikerar en hög aktivitet och det är det man vill åstadkomma i en bra komposteringsprocess.

Många som bor i närheten av avfallsanläggningen har klagat över illaluktande odörer som vinden bär med sig från komposthögarna. Dessa klagomål har lett till myndighetskrav på luktreglering och nu tillämpas sluten kompostering. Detta innebär att kompoststrängarna täcks med ett plasthölje. Innanför detta hölje placeras ett rör som är kopplat till en utsugande fläkt. Luftningen är mycket viktig i en kompost, dels för att förse mikroorganismerna med syre och dels för att hålla ned temperaturen i komposten. Skulle komposten sakna syre så blir den anaerob och det leder till att metangas kan utvecklas. Metangas är en osynlig, giftfri gas som starkt bidrar till växthuseffekten och är inte önskvärd i en komposteringsprocess.

Luftningen skedde tidigare genom att vända i komposten med stora maskiner, men i sluten kompostering är detta inte längre möjligt. Därför används fläkten som suger ut luften via röret. Eftersom luft sugts ut ur komposten måste även luft komma in till den. Den luften sugts in underifrån där platen inte täcker och transporteras genom komposten upp till röret. Detta kan liknas vid en skorsten där luften sugts upp från eldstaden.

I denna studie undersöktes om det var möjligt att styra dessa utsugande fläktar genom att de automatiskt stängs av då de inte behöver vara på. På det viset skulle det vara möjligt att spara in elkostnader för fläktarna.

Arbetet började med att en modell av komposten konstruerades i ett simuleringsprogram. I den modellen simulerades den förväntade temperaturen under processens gång.

Informationen som kunde fås ut från modellen var hur styrningen kunde ske på bästa vis. Den styrningen användes sedan till det verkliga försöket

Tre kompoststrängar undersöktes i två omgångar, där varje omgång pågick i cirka tre veckor. En temperatursensor kopplades till en dator som vidare kopplades till fläkten. Nu kunde fläkten styras genom att datorn fick reda på vilken temperatur som rådde i komposten. Om temperaturen var för låg stängdes fläkten av och vice versa.

Resultatet visade att det går att spara in energi på fläktstyrningen utan att kompostprocessen försämras. I första försöket kunde en 10 procentig effektivisering konstateras och i andra försöket var effektiviseringen cirka 37 %. Anledningen till skillnaderna mellan de två omgångarna var att strängarna halverades till andra försöket och var därför lättare att reglera.

# INNEHÅLL

1. INLEDNING.....	1
1.1 SYFTE .....	1
2. TEORI.....	3
2.1 KOMPOSTERING .....	3
2.1.1 Luftning.....	3
2.1.2 Temperatur, pH och mikroorganismer.....	3
2.1.3 Koldioxid .....	4
2.1.4 Sluten strängkompostering.....	4
2.2 REGLERTEORI .....	5
3. MATERIAL OCH METODER .....	6
3.1 MODELL.....	6
3.1.1 Teori.....	6
3.1.2 Simulering för bestämning av PID-parametrar.....	8
3.1.3 Implementering av PID-regulator i matlab .....	8
3.2 FÖRSÖKSUPPLÄGG .....	8
3.3 ANALYSER OCH PROVER.....	11
3.4.1 Luftflöde .....	11
3.4.2 Temperatur och fläkttid.....	12
3.4.3 pH.....	12
3.4.4 Koldioxid .....	12
3.4.5 Vattenhalt, torrsubstans och askhalt .....	13
3.4.6 Densitet och FAS .....	13
3.4.7 Elförbrukning.....	14
3.4 MODELLVALIDERING .....	14
4. RESULTAT .....	14
4.1 FÖRSÖK 1.....	14
4.1.1 Luftflöde .....	14
4.1.2 Temperatur och fläkttid.....	14
4.1.3 pH.....	17
4.1.4 Koldioxid .....	18
4.1.5 Vattenhalt, torrsubstans och askhalt .....	20
4.1.6 Densitet och FAS .....	21
4.1.7 Elförbrukning.....	21
4.2 FÖRSÖK 2.....	21
4.2.1 Luftflöde .....	21
4.2.2 Temperatur och fläkttid.....	22
4.2.3 pH.....	24
4.2.4 Koldioxid .....	25
4.2.5 Vattenhalt, torrsubstans och askhalt .....	27
4.2.6 Densitet och FAS .....	28
4.2.7 Elförbrukning.....	28
4.3 MODELLVALIDERING .....	29
5. DISKUSSION.....	31
6. SLUTSATSER.....	33
7. REFERENSER .....	34

8. BILAGOR..... 36





## **1. INLEDNING**

På Hovgårdens avfallsanläggning i Uppsala bedrivs bland annat storskalig kompostering av biologiskt material. År 2008 behandlades närmare 6000 ton hushållsavfall och liknande avfall. År 2008 övergick Hovgården från öppen kompostering till täckt kompostering. Metoden har utvecklats med hjälp av två examensarbetare, Ellinor Jonsson och Marie Sandström, som har avlöst varandra sedan hösten 2007 (Sandström 2008, Jonsson 2008). Kompostmaterialet blandas med strukturmaterial och läggs ut i strängar. Överst på strängen placeras ett perforerat rör som är kopplat till en fläkt. Strängarna täcks sedan med ensilageplast för att hindra odörer från att komma ut i luften. Fläktens främsta syfte är att se till att det inte blir anaeroba förhållanden i komposten och att reglera temperaturen. Metoden fungerar bra, men önskemål finns om att utveckla styrningen av fläkten.

Det finns många olika metoder för att kompostera och en stor anledning till att använda sluten kompostering är att minska luktemissioner. Strängkompostering kan användas både inomhus och utomhus och antingen vara luftade med hjälp av fläkt eller att vända kompostmaterialet eller vara helt statiska. Ag-Bag är en metod där komposten läggs i stora plastpåsar och två luftkanaler förser komposten med syre. En annan metod är att kompostera i statiska eller dynamiska bioreaktorer (Chiumenti et al 2005). Reaktorerne delas in i olika kategorier, bland annat vertikala eller horisontella där luftning sker genom både fläktning och vändning.

I denna studie undersöktes om fläktarna går att styra med en återkoppling från temperaturen i kompoststrängen. Detta utan att en negativ effekt på kompostprocessen uppkommer, som till exempel uttorkning. En möjlig energibesparing är också eftersträvansvärt eftersom fläktarna idag går på 100 % dygnet runt. Temperaturgivare från komposten kopplades till en dator där en kontrollalgoritm fanns skriven i MatLab. Innan försöket påbörjades gjordes simuleringar av processen i Simulink för att uppskatta bra parametrar till en PID-regulator. Tre strängar undersöktes i två omgångar där varje omgång omfattar cirka tre veckor.

### **1.1 SYFTE**

En bra reglering av luftningen ger en bra komposteringsprocess eftersom temperaturen har en stor inverkan på den mikrobiella aktiviteten i komposten. Syftet med studien var att få en så bra reglering av temperaturen i komposten som möjligt genom att styra fläktarna som är kopplade till komposten och samtidigt spara energikostnader.

Målet var att erhålla en snabbare kompostprocess genom att styra luftningen och undersöka om det blir någon skillnad i kompostprocessen när olika fläktar och styralgoritmer används.

Fläktarna som är kopplade till komposten går för fullt hela tiden och det finns därför en möjlighet att spara energi genom att styra dessa. En frågeställning var hur mycket energi som kan sparas genom att reglertekniskt styra fläktarna och hur den tillförda luftmängden kan anpassas till kompostens behov i olika stadier av processen.

För att hitta den bästa metoden undersöktes tre strängar i storskalig kompostering med olika fläktstyrningar. Effektmätare installerades på varje fläkt för att se hur mycket energi som gick att spara då fläktarna bara är påslagna då det behövs.

En modell för komposten skapades innan försökets början. Den skapades i syftet att kunna estimeras bra parametrar till en PID-regulator som skulle användas i styralgoritmen.

## **2. TEORI**

### **2.1 KOMPOSTERING**

#### **2.1.1 Luftning**

Luftningen är en nyckelparameter för att kontrollera kompostprocesser och det finns tre huvudsakliga faktorer vad gäller luftningen till en kompost (Haug, 1993). För det första måste komposten förses med syre så att en god mikrobiell aktivitet kan upprätthållas. Syret i porerna i komposten konsumeras inom några minuter varför syreomsättningen är viktig. Om inget syre tillförs skapas anaeroba förhållanden och det kan förekomma metangasbildning. För det andra måste luftning ske för att få bort vatten från våta substrat. Luften som kommer in transporteras genom komposten och bär med sig fuktighet ut från systemet. Den luft som kommer ut har en luftfuktighet på 100 procent. För det tredje måste luft tillföras för att transportera bort värmen som genereras av kompostprocessen. Om inte detta görs finns en risk att temperaturen blir så hög att processen hämmas. Detta på grund av att mikroorganismerna inte klarar av att leva i en alltför varm miljö. Luftbehovet för kylning är normalt större än de andra två i stora komposter (Haug, 1993).

#### **2.1.2 Temperatur, pH och mikroorganismer**

Både temperaturen och pH-värdet är viktiga faktorer för mikroorganismernas aktivitet. Komposten genomgår en initial fas, en högaktiv fas och en mognadsfas. Den initiala fasen karaktäriseras av ökande temperatur och ökande koldioxidproduktion och kan fortgå från en dag till flera veckor (Sundberg, 2005). Ofta är pH lågt vid matavfallskompostering och tillväxten av den mikrobiella biomassan begränsad. Den högaktiva fasen kan pågå i flera veckor, då är tillväxthastigheten hög och därmed fås en hög koldioxidproduktion. Mognadsfasen tar vid då biomassan fortfarande är stor men andelen substrat liten. Koldioxidproduktionen och temperaturen går ned under denna fas. Värmen som utvecklas beror på den mikrobiella aktiviteten och temperaturen kan stiga till 80°C.

Mikroorganismerna delas in i två grupper vilka har sin optimala tillväxt i följande temperaturintervall:

- 25 - 40 °C → mesofil temperatur
- >45 °C → termofil temperatur

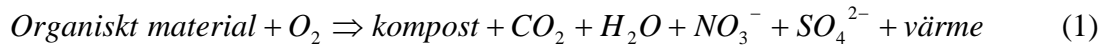
Således finns det mesofila bakterier och termofila bakterier. Intervallet mellan 40 °C och 45 °C kallas för mesofil-termofil transition.

Under den initiala fasen bildas organiska syror som sänker pH-värdet under det neutrala. Under den högaktiva fasen, då de termofila bakterierna är aktiva, hämmar ett lågt pH-värde nedbrytningshastigheten. Ett sätt att motverka denna hämning är att hålla temperaturen under 40°C tills pH-värdet stigit över 6 (Smårs, 2002). Om inte värme transporteras bort under den högaktiva fasen kan temperaturen bli så hög att den mikrobiella aktiviteten minskar. Ett optimalt temperaturintervall för de termofila bakterierna är 55 till 59°C (Miller 1996). Men en god nedbrytning fås även vid högre

temperaturer, dock inte överstigande 70°C. En annan anledning till att ha en hög temperatur är att patogener inte kan överleva då och man får en smittofri kompost. Eftersom temperaturen har stor inverkan på den mikrobiella aktiviteten är det den faktorn som är viktigast att kontrollera.

### 2.1.3 Koldioxid

Avgången av koldioxid är ett bra mått på hur stor mikrobiell aktivitet som finns i komposten. När mikroberna konsumerar substratet respirerar de koldioxid (ekvation 1).



Koldioxidavgången är ofta relaterad till vilket pH det är i komposten. När pH stigit över 6 och temperaturen stigit över 40°C ses ofta ett maximum i koldioxidemissionen, detta på grund av att aktiviteten ökar och därmed även respirationen (Smårs, 2002). En hög aktivitet bidrar till en högre nedbrytningshastighet vilket ger en bättre kompostprocess.

### 2.1.4 Sluten strängkompostering

Sluten kompostering med fläktar görs på många olika sätt. Metoden i denna studie går ut på att komposten läggs ut i strängar och ovanpå komposten placeras perforerade rör som är kopplade till en sugande fläkt. Allt täcks med ensilageplast och när fläkten är igång sugas luft in underifrån och transporteras genom komposten och ut via de perforerade rören (se figur 1). På så vis förses komposten med syre och temperaturen kan hållas ned. Denna metod utnyttjar den skorstenseffekt som driver luftningen vid öppen strängkompostering och är utvecklad i Uppsala (Sandström 2008, Jonsson 2008). Myndighetskrav på luktreglering och hygienisering gör att sluten kompostering blir alltmer utnyttjad. Lukten är relaterad till pH och ett lågt pH bidrar till en hög luktkoncentration (Sundberg m.fl. 2008).



**Figur 1.** Sluten strängkompostering vid Hovgården, Uppsala. Fotograf Evgheni Ermolaev.

## 2.2 REGLERTEORI

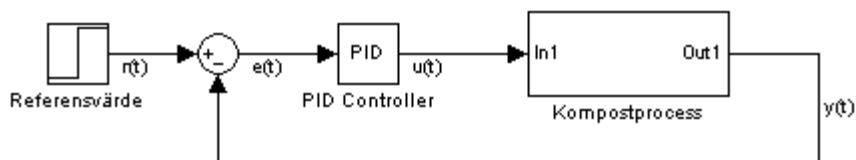
För att styra fläktarna som är kopplade till kompoststrängarna används ett styrprogram innehållande en PID-regulator. En PID-regulator består av en proportionell(P), integrerande(I) och en deriverande(D) del och beskrivs av ekvationen:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

där  $u(t)$  är styrsignalen,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  koefficienter för proportionell, integrerande respektive deriverande verkan,  $\tau$  en integrationsvariabel och  $e(t)$  reglerfelet som ges av:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

där  $y(t)$  är den storhet som ska regleras och  $r(t)$  referensvärdet för  $y(t)$ . I detta fall ser systemet ut som i figur 2.



**Figur 2.** Blockschemata för PID-reglering.

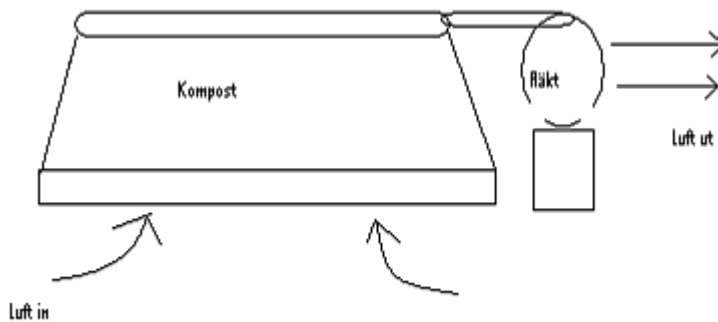
Temperaturen regleras genom att referensvärdet jämförs med den återkopplade aktuella temperaturen i komposten. PID-regulatorn skickar en styrsignal till kompostprocessen där

fläkten antingen slås av eller på. Regulatorn måste vara inställd så att den snabbt får temperaturen att gå till referensvärdet utan att orsaka ett instabilt system. Några enkla tumregler är att ett högt värde på  $K_p$  ökar snabbheten men kan ge ett instabilt system, integralk termen med  $K_i$  eliminerar statiska fel i utsignalen men försämrar stabiliteten och derivationsdelen med  $K_d$  som koefficient kan förbättra stabiliteten. För många industriella processer har man ingen matematisk modell som kan användas för att räkna fram bra koefficienter i regulatorn. Man försöker i stället uppnå bra reglering genom att successivt testa olika inställningar när processen är i drift (Glad och Ljung, 1989). Eftersom inställningarna var svåra att testa under försökets gång skapades en simuleringsmodell för kompostprocessen där olika inställningar testades.

### 3. MATERIAL OCH METODER

#### 3.1 MODELL

En modell för att simulera kompostprocessen skapades i Simulink. Syftet med modellen var att beskriva ett verklighetstroget förlopp för att bestämma parametrarna till den PID-regulator som skulle användas i försöken. Modellen baseras på värmeenergin in och ut från komposten transporterad med luften (se figur 3).



**Figur 3.** Översikt över hur luft transporteras genom komposten.

##### 3.1.1 Teori

Temperaturen i komposten är variabeln som återkopplas till systemet. Denna bestäms av:

$$T = \frac{ME_{tot}}{C_p} \quad (4)$$

Där  $T$  är temperaturen [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $E_{tot}$  [J] är värmeenergin i komposten,  $C_p$  [ $\text{J}/^{\circ}\text{CKg}$ ] den specifika värmekapaciteten i kompostmaterialet och  $M$  [Kg] kompostens massa. Den specifika värmekapaciteten i kompostmaterialet är en approximation från Haug (1993).

I modellens kompostprocess (figur 4) beräknas värmeenergin i komposten genom att ta skillnaden mellan värmeproduktionen i strängen och energin bortförd av fläkten (ekvation 5)

$$E_{tot} = E_{prod} - E_{bortförd} \quad (5)$$

Energien beräknades som kilojoule per minut eftersom varje steg i simuleringen motsvarar en minut.

Koldioxiden från mikroorganismernas respiration är ett mått på deras aktivitet och kan relateras till energin i komposten. För att få ett mått på aktiviteten har värden på kolomsättningen tagits från ett experiment utfört i en kompostreaktor (Sundberg m.fl. 2008). Detta experiment utfördes av Sven Smårs på institutionen för energi- och teknik, SLU Uppsala, och pågick i cirka 16 dagar. Modellen ska behandla storskalig kompostering och därför måste värden från reaktorn multipliceras med en omvandlingsfaktor enligt ekvation 6.

$$Y = C_{andel} M \quad (6)$$

där Y är omvandlingsfaktorn,  $C_{andel}$  andelen kol i reaktorns kompostmassa, M kompostens massa [kg]. Den initiala kolmängden och den totala vikten var kända i reaktorn och andelen kol i kompostmassan kunde beräknas.

För att få ut den producerade energin uttryckt som kilojoule per minut användes ekvation 7.

$$E_{prod} = E_{CO_2} \frac{C_{oms}}{M_{CO_2}} \quad (7)$$

där  $E_{CO_2}$  är antalet kJ per mol koldioxid [kJ/molCO<sub>2</sub>],  $C_{oms}$  kolomsättningen [kg/min] och  $M_{CO_2}$  molvikten för koldioxid.

Den av fläkten bortförda energin kunde fås ut genom att beräkna skillnaden i specifik entalpi, H, mellan den till komposten ingående luften och den utgående luften, se figur 3. Den specifika entalpin beräknades enligt ekvation 8.

$$H = C_{pl}T + X(L_{vo} + C_{pw}T) \quad (8)$$

där  $C_{pl}$  är luftens specifika värmekapacitet, T är temperaturen i komposten,  $C_{pw}$  är ångans specifika värmekapacitet vid 0 °C,  $L_{vo}$  är den specifika ångbildningsentalpin och X ett blandningsförhållande på hur mycket vattenånga det finns i ett kilo torr luft (ekvation 9 nedan)

$$X = \frac{0,622e_a}{p - e_a} \quad (9)$$

där  $e_a$  är luftens ångtryck och p det atmosfäriska trycket.

Värmeenergin som tas bort från komposten ges av ekvation 10.

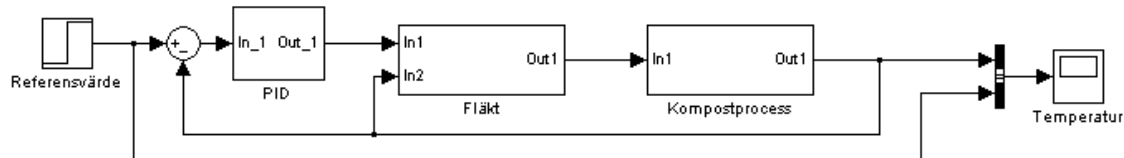


$$E_{\text{bortförd}} = H_{\text{ut}} - H_{\text{in}} \quad (10)$$

Den totala värmeenergin och temperaturen fås slutligen fram enligt ekvation 4 och 5.

### 3.1.2 Simulering för bestämning av PID-parametrar

Simulink är ett simuleringsprogram i Matlab och kompostmodellen kan ses i figur 4 nedan. Temperaturen återkopplas till PID-regulatorn som ger en signal in till fläktsystemet. Detta undersystem ses i bilaga 1.



**Figur 4.** Kompostmodell gjord i Simulink.

Insignalen kommer från PID-regulatorn och behandlas i en min/max-algoritm för att begränsa signalen mellan 0,1 och 1. Detta värde jämförs med en signal som skickar ut värden motsvarande [0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 0]. Om skillnaden mellan signalerna är större än noll kör fläkten igång. På detta vis regleras hur stor andel av tiden som fläkten ska vara på. Om signalen exempelvis är 0,1 så kör fläkten 10% av samplingstiden (1 minut av 10 minuter). När brytreläet indikerar att fläkten ska blåsa så anropas en matlabfunktion som talar om hur mycket energi som bortförs (se teoriavsnittet 3.1.1). Denna funktion heter *entalpi* och beräknar skillnaden i entalpi mellan ingående och utgående luft från komposten. Den har den aktuella temperaturen som insignal och koden kan ses i bilaga 4. Utsignalen är energibortförseln och skickas vidare till kompostprocessen. Denna process är illustrerad i bilaga 2.

Nettoenergin lagras i blocket Energi\_kompost och tar skillnaden mellan den bortförda energin och energin i komposten. Energin i komposten beräknas enligt föregående teoriavsnitt och hämtas av blocket EnergiProdStreang. Tillsist beräknas temperaturen med ekvation 1 och den specifika värmekapaciteten hämtas från undersystemet Varmekap. Detta undersystem kan ses i bilaga 3 och den får som insignal tiden i dygn.

Temperaturen beräknas och återkopplas till PID-regulatorn.

Parametrarna till PID-regulatorn bestämdes genom att testa olika parametrar tills en bra reglering erhöles.

### 3.1.3 Implementering av PID-regulator i matlab

Utifrån resultatet från Simulink skapades ett program i Matlab som använder samma parametrar till PID-regulatorn för användning till fläktstyrning i försöken. Temperaturen skickas till programmet via en temperatursensor.

## 3.2 FÖRSÖKSUPPLÄGG

Tre strängar undersöktes på Hovgården i två omgångar (försök 1 och 2). Sträng 1 styrdes genom att återkoppla temperaturen med en temperaturgivare belägen högt upp i mitten av strängen där temperaturen förmodades bli som högst. Kontrollalgoritmen hade ett initialt

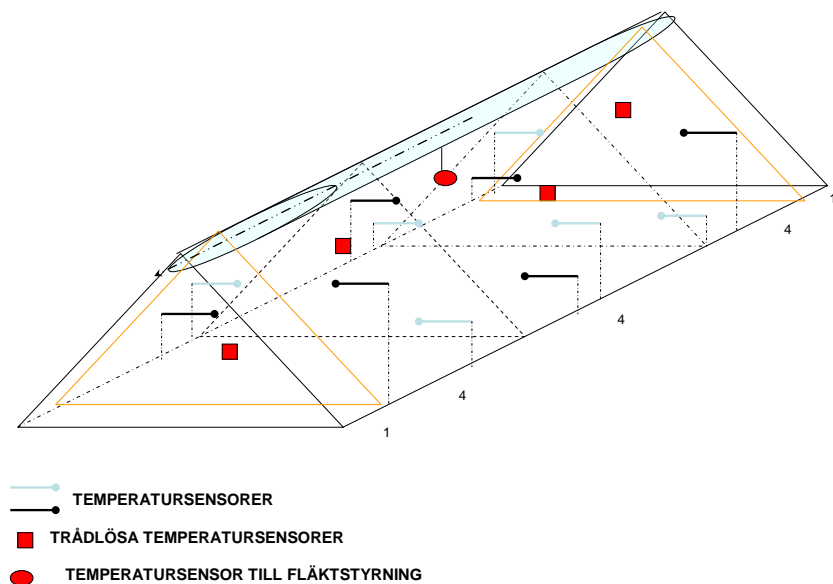
börvärde på 37 grader och ställdes sedan manuellt om till 60 grader då pH stigit över 6. I Sträng 2 hölls börvärdet på 65 grader hela tiden. Sträng 3 styrdes inte utan fläkten gick för fullt hela tiden. Den användes som en referens till de andra två. Se tabell 1.

**Tabell 1.** Fläktflöden och referensvärden till försök 1 och 2.

	Fläkt 1	Fläkt 2	Fläkt 3
Flöde [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	1360	520	450
Referensvärde [ $^{\circ}\text{C}$ ]	37 $\rightarrow$ 60	65	-

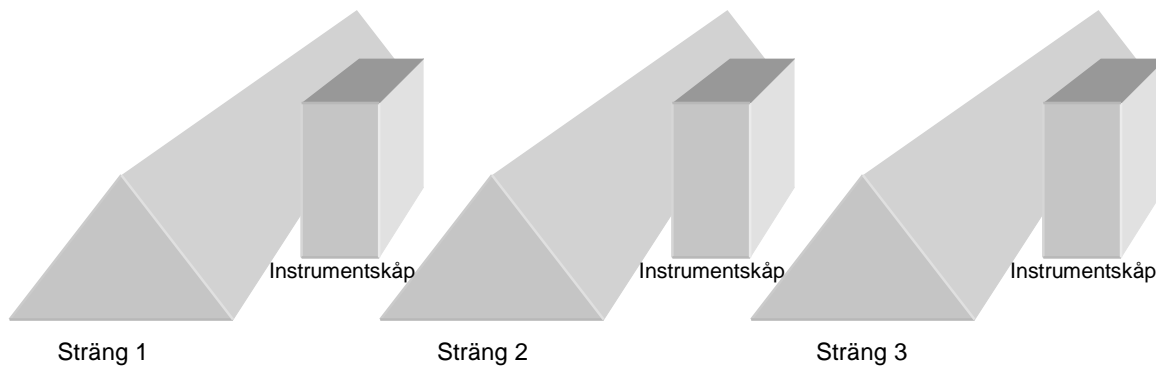
Fläktarna var medeltrycksfläktar av fabrikatet Colasit Skandinavica AB, modell CMV 160. I första strängen hade fläkten ett högre varvtal vilket gör att den får en högre kapacitet och kan därmed hålla en lägre temperatur vid hög aktivitet.

Förutom temperaturgivarna som var kopplade till styralgoritmen i Matlab loggades temperaturen med andra temperaturgivare. Dessa placerades ut i kompoststrängen så att temperaturfördelningen kunde ses över hela strängen, se figur 5.



**Figur 5.** Temperaturgivarnas position i kompoststrängen (Bild från F.Agostini, institutionen för energi- och teknik, SLU Uppsala ).

Strängarnas upplägg med instrumentskåpen kan ses i figur 6.



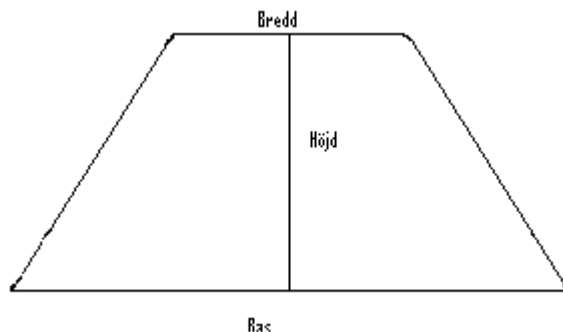
**Figur 6.** Illustration av uppställningen av kompoststrängar och mätskåp på Hovgården.

Fläktarna till sträng 1 och 2 styrdes via en dator i instrumentetskåpet. En sensor från vardera sträng gav temperaturen som indata till Matlab. Matlab gav sedan en styrsignal till ett relä i skåpet. Detta relä var i sin tur kopplat till manöverströmmen till fläktarna. På detta vis kunde fläktarna styras med en så kallad av- och påmetod.

I försök 1 som pågick i april 2009 var strängarna cirka 20 meter långa och 1,7 meter höga. Försök 2 påbörjades i maj och längden på strängarna minskades till 10 meter för att kunna temperaturkontrollera dem lättare. Strängarnas dimensioner för försök 2 mättes noggrannare och kan ses i tabell 2, där måtten är tagna enligt figur 7.

**Tabell 2.** Strängarnas dimensioner i försök 2.

	<b>Sträng 1</b>	<b>Sträng 2</b>	<b>Sträng 3</b>
<b>Bas [m]</b>	3,7	3,7	4,0
<b>Höjd [m]</b>	1,7	1,7	1,7
<b>Bredd [m]</b>	1,7	1,7	1,6
<b>Volym [m<sup>3</sup>]</b>	45,9	45,9	47,6



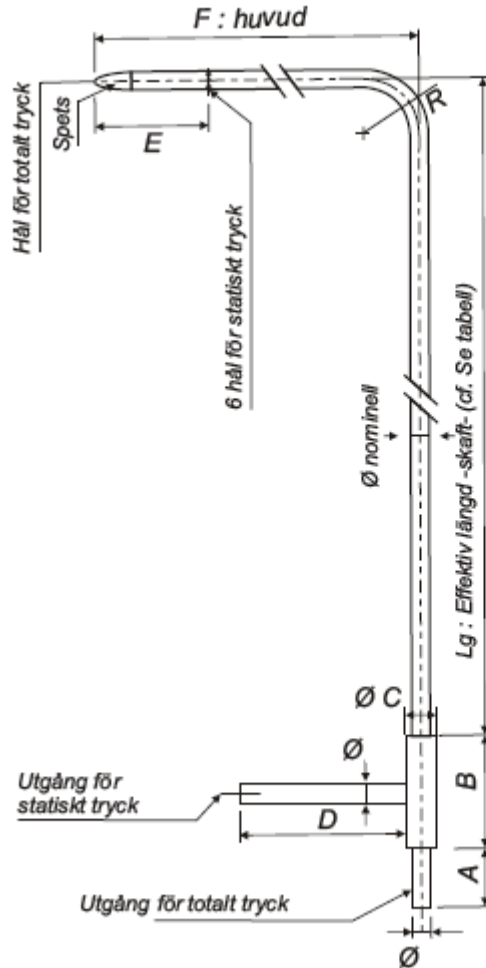
**Figur 7.** Strängarnas dimensioner till försök 2.

I både försök 1 och försök 2 användes samma referensvärden som är givna i tabell 1.

### 3.3 ANALYSER OCH PROVER

#### 3.4.1 Luftflöde

Med hjälp av ett prandtlrör (typ L, AFNOR NFX 10 – 112, kimo instrument Sverige AB) kan totaltrycket och det statiska trycket mätas i luftkanalen, se figur 8.



**Figur 8.** Prandtlrör (figur tagen från <http://www.kimo.se/pdf/Pitot> ).

Huvudet riktas mot flödesriktningen i luftkanalen. Prandtlröret är anslutet med plastslangar till en u-rörsmanometer som visar tryckskillnaden (dynamiskt tryck) i millimeter vattenpelare, där 1 mmH<sub>2</sub>O motsvarar 9,81 Pa. Följande uttryck kan användas för att få ut lufthastigheten:

$$P_{tot} = P_s + P_d = P_s + \frac{\rho u^2}{2} \quad (11)$$

där  $P_{tot}$  är det totala trycket,  $P_s$  det statiska trycket,  $P_d$  det dynamiska trycket,  $\rho$  luftens densitet och  $u$  luftens hastighet.

Ur ekvation 11 följer att luftens hastighet är:

$$u = \sqrt{\frac{2P_s}{\rho}} \quad (12)$$

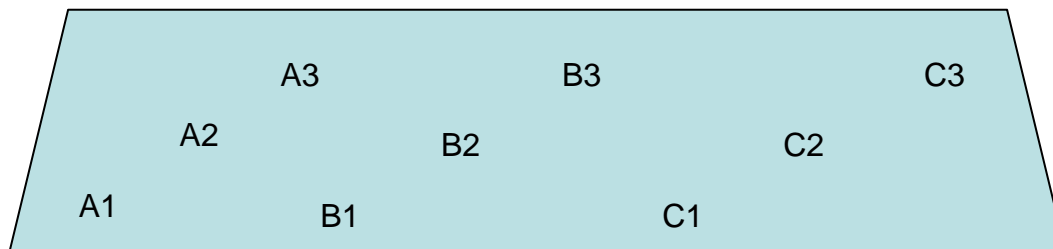
Luftflödet kan nu beräknas genom att multiplicera hastigheten med luftningskanalens area. Luftens densitet antas vara  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Prandtlröret som användes hade en diameter på 3 mm. Enligt (Johansson och Svensson, 2007) bör prandtlrör med diameter mindre än 4 mm användas vid kanaldimensioner mindre än 200 mm, vilket är fallet i denna studie. Vid sträng 1 är två luftkanaler kopplade till fläkten med diametrar på 185 mm. Vid sträng 2 och 3 användes en luftkanal med diameter på 150 mm. Det ska även vara en raksträcka innan mätplatsen som är fem gånger diametern och en raksträcka efter på 2 gånger diametern.

### 3.4.2 Temperatur och fläkttid

Under hela försöket loggades temperaturen med termoelement och trådlösa temperaturgivare (figur 8). Den tid som fläkten var på loggades av matlabprogrammet. Var tionde minut loggades en ny temperatur och fläkttiden kunde som minst vara 10 % av samplingsintervallet vilket motsvarar 1 minut. Anledningen till att en miniminivå sattes var att undvika anaeroba förhållanden i komposten.

### 3.4.3 pH

pH mättes manuellt, en gång per dag vid försökens början, både i kondensatet från fläktarna och i kompostmaterialet. Genom att göra mätningar i kondensatet så kunde pH kontrolleras direkt. Om en ökning i pH kunde ses ändrades referensvärdet i styrprogrammet. Kompostprover samlades in från varje sträng och frystes ned för senare pH-bestämning. När detta skulle göras tinades proverna i labbet och späddes ut med avjoniserat vatten (5:1). Efter utspädningen fick proverna stå och dra i en timme innan pH mättes. Proverna togs enligt figur 9.



**Figur 9.** Provtagningsplatser i kompoststrängen.

### 3.4.4 Koldioxid

Eftersom koldioxidavgången är ett mått på kompostens nedbrytning mättes koldioxidhalten vid fläktens utblås. Luft samlades in i små glasbehållare och analyserades med gaskromatografi. Detta utfördes av E.Ermolaev (doktorand på institutionen för energi och teknik, SLU Uppsala.). Resultatet som fås av gaskromatografen ger ett värde i parts per million (ppm). För att få ett användbart värde på koldioxidavgången har ekvation 13 använts.

$$CO_{2avg} = Ktx \quad (13)$$

där  $CO_{2avg}$  är koldioxidavgången [ml/h], K fläktkapaciteten [ $m^3/h$ ], t fläkttiden [%] och x givna mätvärdet [ml/l].

### 3.4.5 Vattenhalt, torrsubstans och askhalt

Vattenhaltsprover samlades in vid tre tillfällen från samma ställen som pH-proverna. Dessa vägdes i skålar före och efter torkning i 14 timmar i en 110 °C varm ugn. Vattenhalten kunde sedan fås ut genom att dividera andelen vatten med vikten före torkning (ekvation 14). Vattenhalten är en viktig parameter för mikroorganismerna vilka trivs vid en fuktighet av cirka 60 %.

$$\theta_{vikt} = \frac{m_{vatten}}{m} \quad (14)$$

där  $\theta_{vikt}$  är vattenhalten,  $m_{vatten}$  vattenvikten och m provets vikt.

Torrsubstansen är den mängd torrt material som återstår efter torkning (ekvation 15).

$$TS = 1 - \theta_{vikt} \quad (15)$$

För att beräkna askhalten användes proverna från vattenhaltsbestämningen. Dessa fick glödgas i fyra timmar i en 500 °C varm ugn och sedan dividerades vikten aska med den torra vikten (ekvation 16).

$$Askhalt = \frac{m_{aska}}{m_{torr}} \quad (16)$$

där  $m_{aska}$  är vikten aska och  $m_{torr}$  är provets vikt efter torkning.

### 3.4.6 Densitet och FAS

För att bestämma densiteten och luftporvolym (free air space, FAS) användes ett förenklat tillvägagångssätt. En hink på tio liter fylldes med råge av kompostmaterial och släpptes tre gånger från en höjt på cirka en decimeter. Detta för att återskapa en liknande packning som i komposten. Hinken vägdes och densiteten kunde beräknas. FAS bestämdes genom att fylla den fulla hinken med vatten tills ytan tangerades. Därefter vägdes hinken igen och FAS beräknades (ekvation 17).

$$FAS = \frac{m_{H_2O} - m}{V\rho_{H_2O}} \quad (17)$$

där m är den fulla hinkens massa,  $m_{H_2O}$  den fulla hinkens massa med vatten, V hinkens volym och  $\rho_{H_2O}$  vattnets densitet.

### 3.4.7 Elförbrukning

För att kunna se hur mycket energi som fläktarna hade förbrukat monterades effektmätare där effekten kunde ses digitalt.

## 3.4 MODELLVALIDERING

Modellen i Simulink validerades efter försöken. Modellen simulerades efter liknande förhållande som försök 2. Inparametrarna, fläktflöde, kompostmassa, referensvärde och utomhustemperatur imiterades efter de verkliga värdena till försök 2.

## 4. RESULTAT

### 4.1 FÖRSÖK 1

#### 4.1.1 Luftflöde

Flödesmätningar med prandtlrör gjordes vid ett flertal tillfällen och mätningarna skilde sig inte signifikant åt. I tabell 3 redogörs för mätningar och luftflöden.

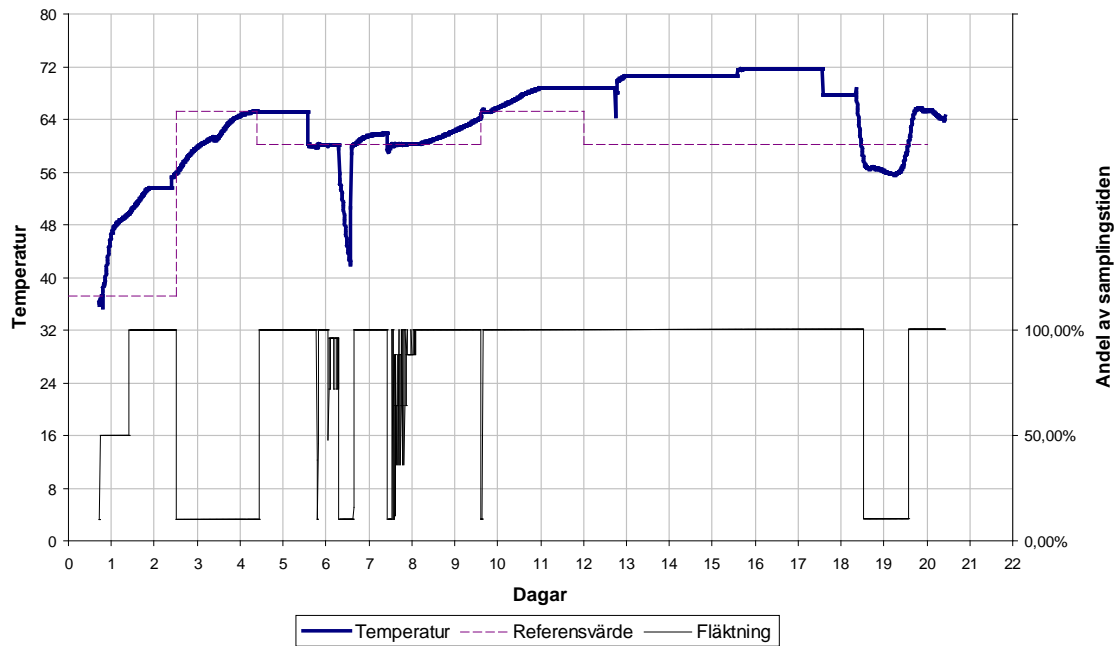
Tabell 3. Luftflöden för försök 1.

	Fläkt 1	Fläkt 2	Fläkt 3
Tryck (mmH <sub>2</sub> O)	3	4	3
Dynamiskt tryck [Pa]	29,43	39,24	29,43
Hastighet [m/s]	7,00	8,09	7,00
Area [m <sup>2</sup> ]	2*0,0269	0,0177	0,0177
Flöde [m <sup>3</sup> /h]	2*680	520	450
Flöde [m <sup>3</sup> /hton <sub>avfall</sub> ]	2*16	12	10

Fläkten vid första strängen ger ett upphov till ett flöde på cirka 1360 m<sup>3</sup>/h medan de andra två är en faktor 2,5-3 svagare. Tabellen visar även flödet per ton avfall i strängarna. Massan var uppskattad till cirka 130 ton för alla strängarna efter att de vägts av personalen på Hovgården. Fläktarna till sträng 2 och 3 är identiska och skillnaden dem emellan kan förklaras med att strängarna inte är lika långa och felkällor i flödesmätningen.

#### 4.1.2 Temperatur och fläkttid

Temperaturen och den andel tid som fläkten var på för sträng 1 visas i figur 10 nedan.

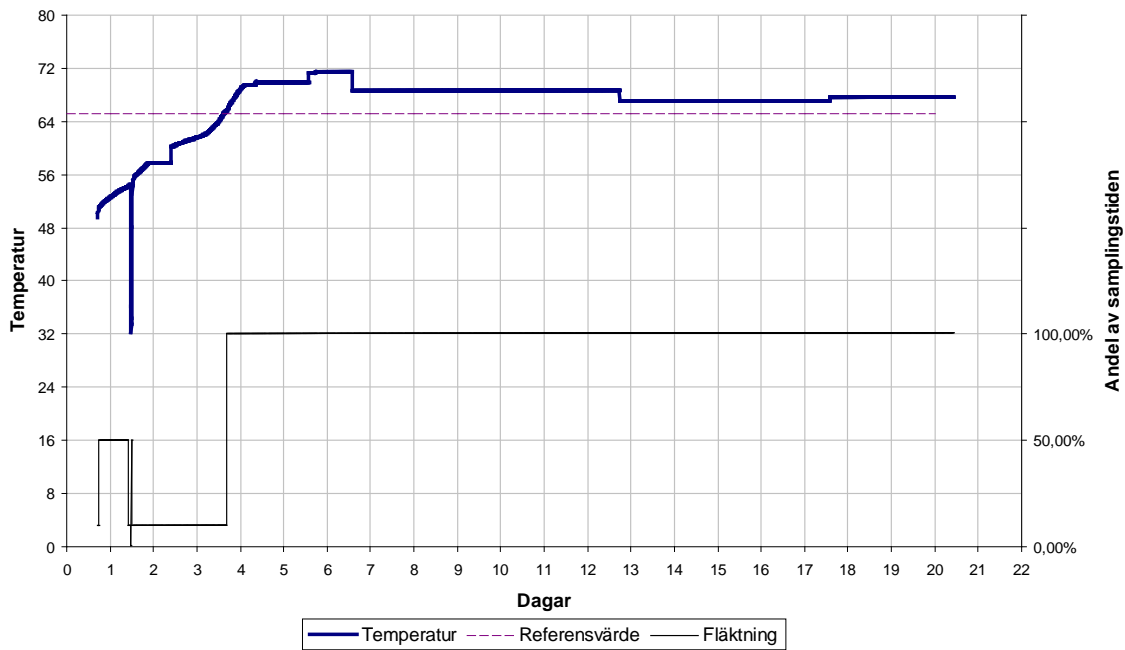


**Figur 10.** Temperatur och fläktning för sträng 1, försök 1.

Det kan ses att fläkten inte har kapacitet nog att hålla ned temperaturen på 37 grader i början, men att den kan hålla en ganska jämn nivå vid 60 grader efter några dagar. När aktiviteten ökar under åttonde dagen klarar inte fläkten att hålla ned temperaturen och den stiger över 70 grader.

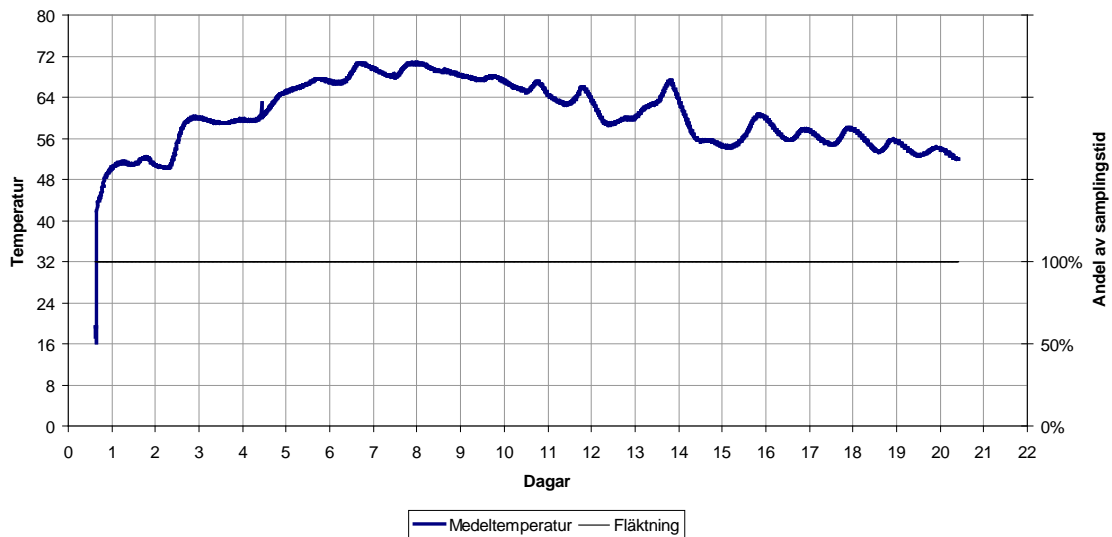
I sträng 2 hålls ett konstant referensvärde på 65 grader (figur 11). Här klarar inte fläkten att hålla referensvärdet trots att fläkten står på max så gott som hela tiden. En anledning kan vara för stor kompostmassa och för låg kapacitet på fläkten.





**Figur 11.** Temperatur och fläktning för sträng 2, försök 1.

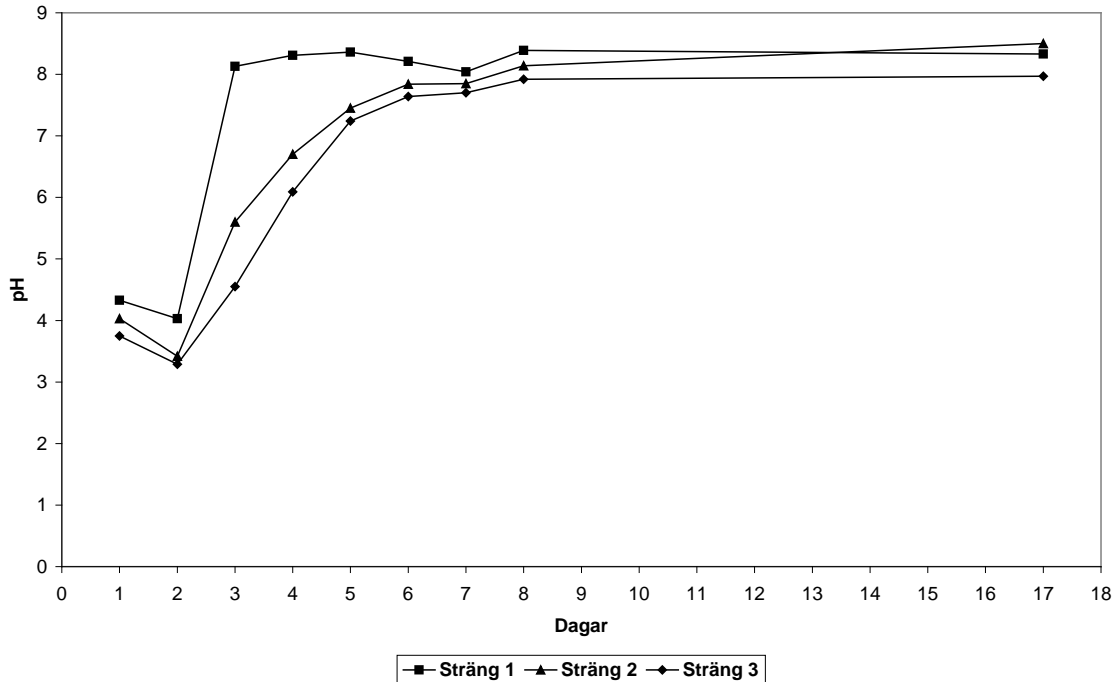
I sträng 3 sker ingen styrning och fläkten står på max hela tiden (figur 12). Temperaturen är ett medelvärde av temperatursensorerna i strängen och har inte en styrsensor som i övriga strängar. Temperaturen stiger till 70 grader trots att fläkten står på 100 procent hela tiden.



**Figur 12.** Temperatur och fläktning för sträng 3.

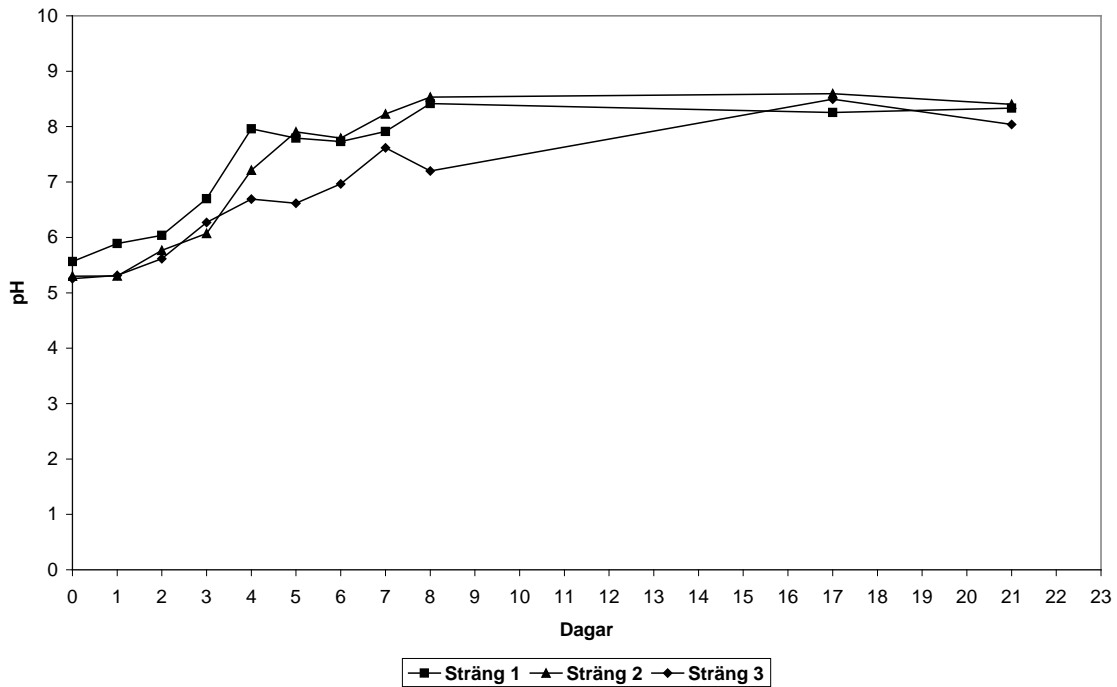
### 4.1.3 pH

Efter tre dagar kunde det noteras att pH i kondensatet hade stigit drastiskt i första strängen, se figur 13. Eftersom pH hade överstigit 6 så ställdes referensvärdet om till 65 grader i sträng 1. Övriga strängar översteg detta värde några dagar senare.



**Figur 13.** pH i kondensatet från strängarna.

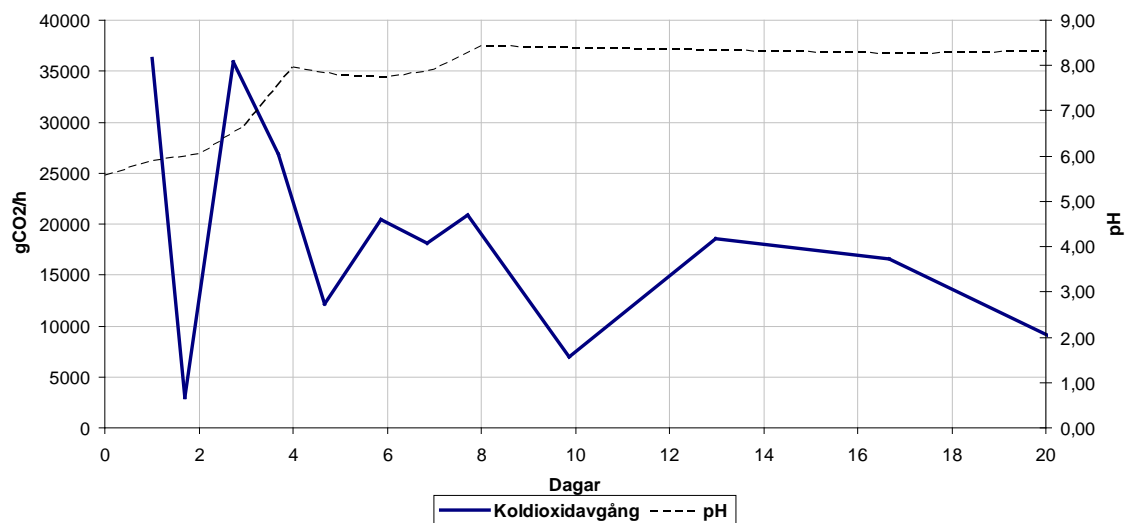
När pH-mätningar gjordes på kompostprover i labbet visades det att skillnaderna mellan strängarna inte är lika stora som vid pH i kondensatet (figur 14), detta har även hänt i andra försök (till exempel Sundberg m.fl. 2008). Detta kan bero på att proverna inte frystes ned direkt efter tagningarna och kan då ha förändrats i pH. Dock har sträng 1 ett lite högre pH än övriga under dag 1-5 (Bilaga 5).



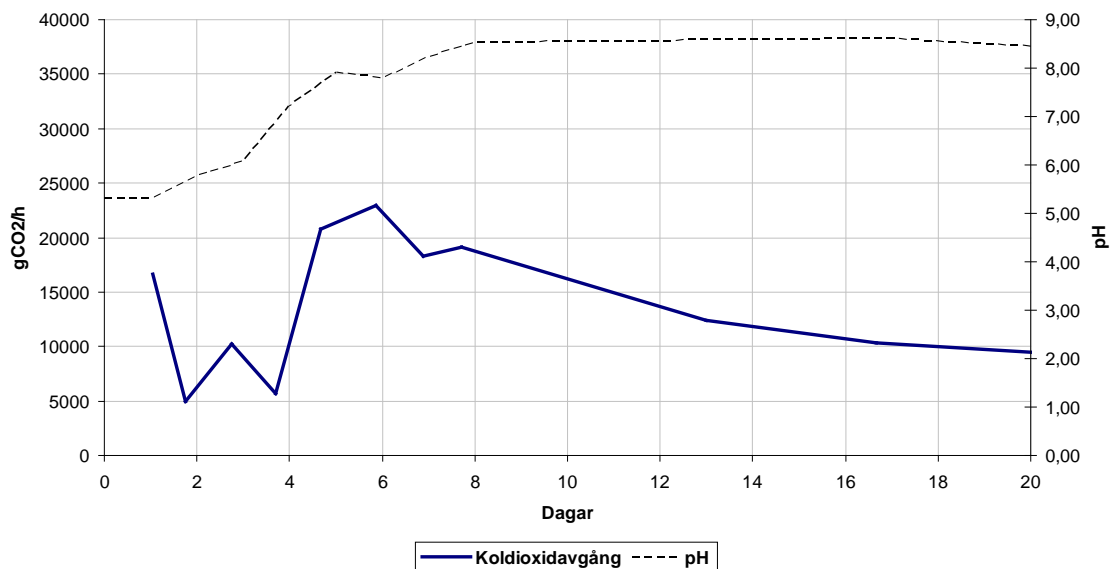
**Figur 14.** Medelvärde för pH i strängarna.

#### 4.1.4 Koldioxid

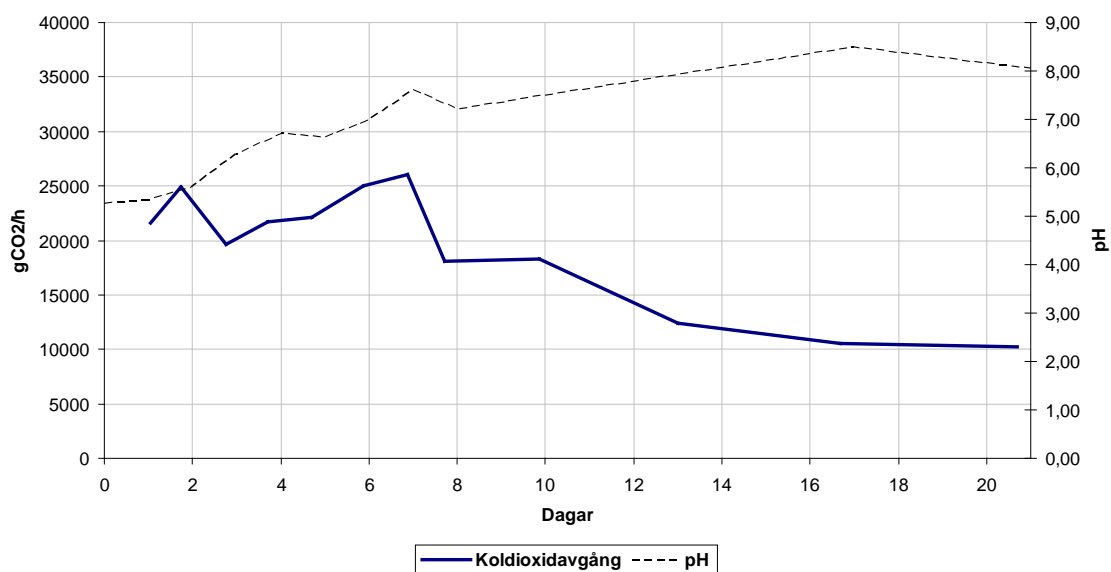
Den justerade koldioxidavgången (enligt ekvation 13) tillsammans med pH för strängarna kan ses i figur 15-17. Värdena från gaskromatografen kan ses i bilaga 8.



**Figur 15.** Koldioxidproduktion och pH i sträng 1.

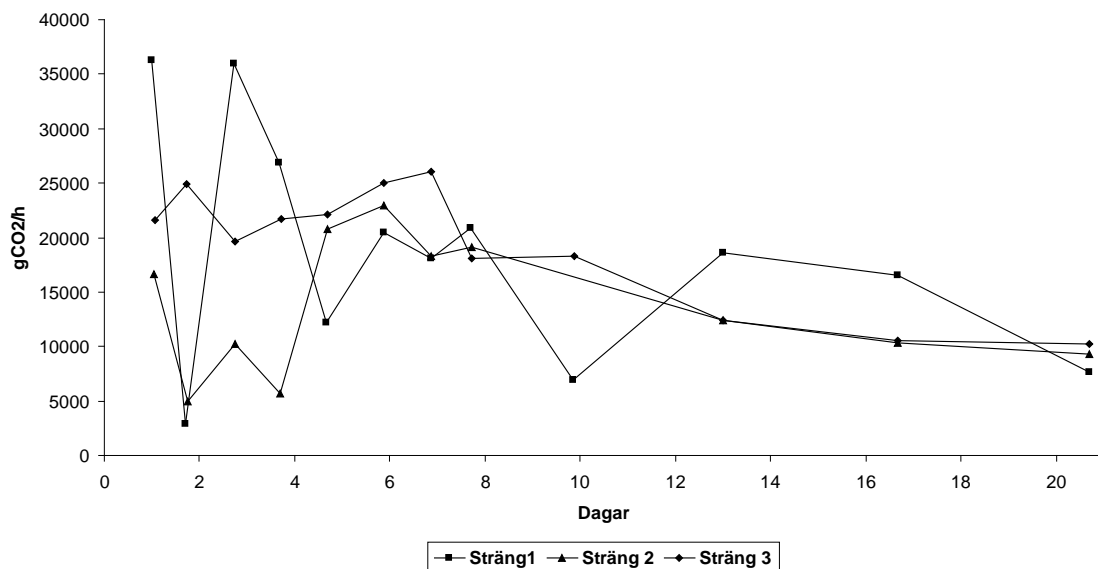


**Figur 16.** Koldioxidproduktion och pH i sträng 2.

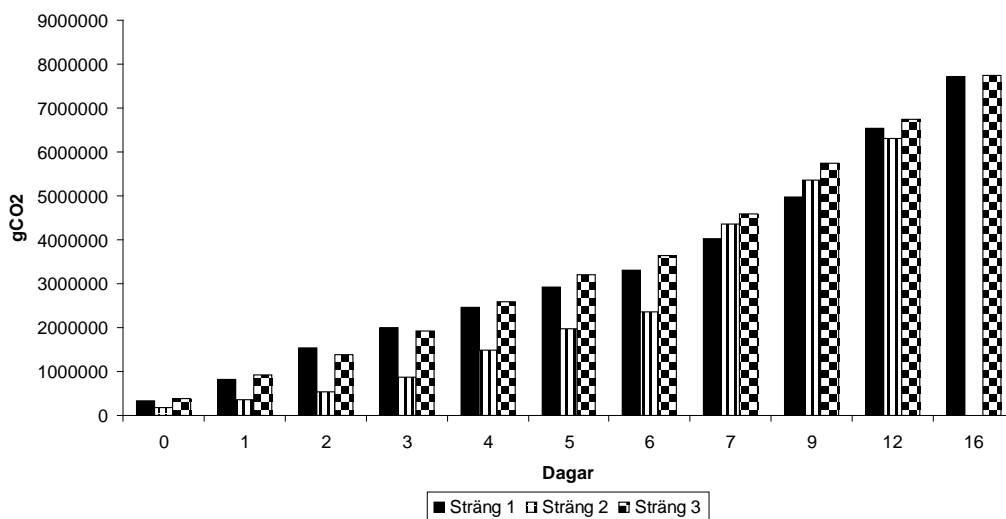


**Figur 17.** Koldioxidproduktion och pH i sträng 3.

I ovanstående figurer kan det som förväntat ses att koldioxidavgången var som högst efter att pH har stigit över 6. I figur 18 jämförs avgången mellan alla strängarna. Sträng 1 hade sitt högsta värde tidigare på grund av den tidiga pH ökningen. Men det ackumulerade värdet visar att koldioxidavgången är lite högre i sträng 3 än vad den är i sträng 1 (figur 19). Här saknas ett värde för avgången koldioxid för sträng 2 varför det inte är med i sista stapeln.



**Figur 18.** Jämförelse av koldioxidavgången i strängarna.



**Figur 19.** Jämförelse av den ackumulerade koldioxidavgången mellan strängarna.

#### 4.1.5 Vattenhalt, torrsubstans och askhalt

Medelvärdena för vattenhalt, torrsubstans och askhalt kan ses i tabell 4. Alla provtagningar redovisas i bilaga 7.

**Tabell 4.** Medelvärden vattenhalt, askhalt och andel torrsubstans i varje sträng (försök 1).

Dag	Sträng 1			Sträng 2			Sträng 3		
	1	9	22	1	9	22	1	9	22
<b>Vattenhalt [%]</b>	60	63	60	60	60	59	60	60	65
<b>Askhalt [%]</b>	39	43	46	34	39	42	35	39	43
<b>Torrsubstans [%]</b>	40	37	40	40	40	41	40	43	35

Vattenhalten ändras inte mycket under försöket, vilket tyder på att fläktarna inte torkar ut materialet. Askhalten ökar vilket är ett tecken på nedbrytning. Glödgningen bränner bort det organiska materialet och om mycket organiskt material redan är nedbrutet av mikroorganismerna ökar andelen aska som är kvar efter förbränningen.

#### 4.1.6 Densitet och FAS

I tabell 5 visas beräkningarna av densiteten i kompostmaterialet och FAS för den sista dagen av försöket. Densiteten och FAS kan variera beroende på när försöket gjordes och dessa är förmodligen inte samma som vid försökens början eftersom volymen kompost minskade efter hand

**Tabell 5.** Densitet och FAS, sista dagen (försök 1).

Hink (10 dm <sup>3</sup> ) [kg]	Full hink [kg]	Full hink + H <sub>2</sub> O [kg]	Densitet [kg/dm <sup>3</sup> ]	FAS [%]
0,34	5,92	10,44	0,56	45

#### 4.1.7 Elförbrukning

Efter 20 dagar var den ackumulerade elförbrukningen högst för motorn i fläkt 1. Detta på grund av att den har en större kapacitet och drar mer ström. Elförbrukningen för alla fläktmotorer kan ses i tabell 6.

**Tabell 6.** Elförbrukningen för fläktarna efter 20 dagar (försök 1).

	Fläkt 1	Fläkt 2	Fläkt 3
Motor [kW]	0,5	0,21	0,21
Elförbrukning [kWh]	201,5	87,6	97,1

Skillnaden mellan sträng 2 och 3 har varit 9,5 kWh vilket är nästan 10 %.

## 4.2 FÖRSÖK 2

### 4.2.1 Luftflöde

Luftflödesmätningarna för försök 2 kan ses i tabell 7.

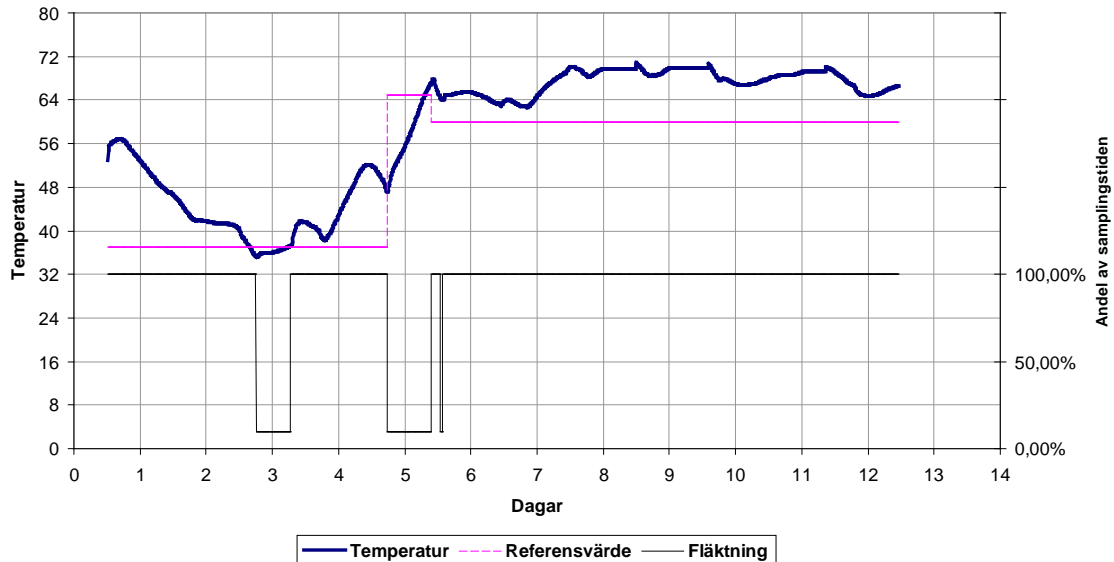
**Tabell 7.** Luftflöden för försök 2.

	Fläkt 1	Fläkt 2	Fläkt 3
Tryck (mmH <sub>2</sub> O)	3	4	3
Dynamiskt tryck [Pa]	29,43	39,24	29,43
Hastighet [m/s]	7,00	8,09	7,00
Area [m <sup>2</sup> ]	2*0,0269	0,0177	0,0177
Flöde [m <sup>3</sup> /h]	2*680	520	450
Flöde [m <sup>3</sup> /hton <sub>avfall</sub> ]	2*33	25	21

Värdena i tabell 7 är identiska med tabell 3 förutom flödet per ton avfall, eftersom strängarna var mindre i försök 2 (se 3.2).

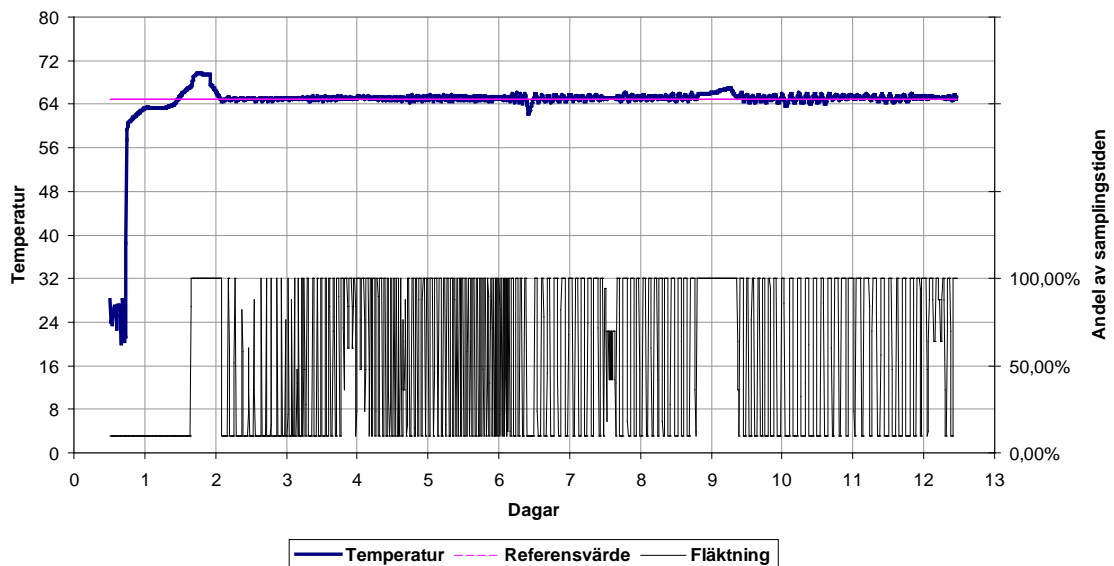
## 4.2.2 Temperatur och fläkttid

Temperaturen och den andel tid som fläkten var på för sträng 1 visas i figur 20 nedan. Eftersom fläktarna kopplades in dagen efter det att strängarna hade blivit upplagda hade temperaturen redan hunnit stiga till över 50 grader. När fläktarna slogs igång sjönk temperaturen ned till referensvärdet. Sedan sker en temperaturökning och även efter referenshöjningen klarar fläkten inte av att hålla ned temperaturen.



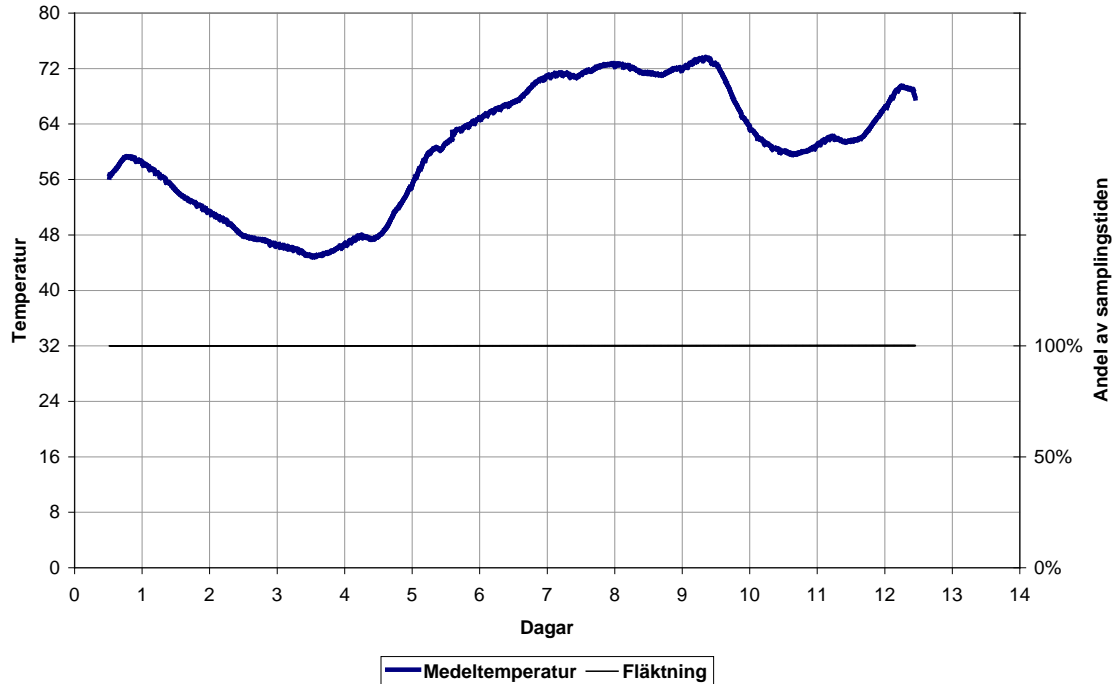
**Figur 20.** Temperatur och fläkting i sträng 1.

I sträng 2 hålls ett konstant referensvärde på 65 grader (figur 21). Här kan den låga initiala temperaturen förklaras med att det tar en viss tid för temperatursensorn att värmas upp. Regleringen sker sedan mycket bra och temperaturen kan hållas på 65 grader.



**Figur 21.** Temperatur och fläkting i sträng 2.

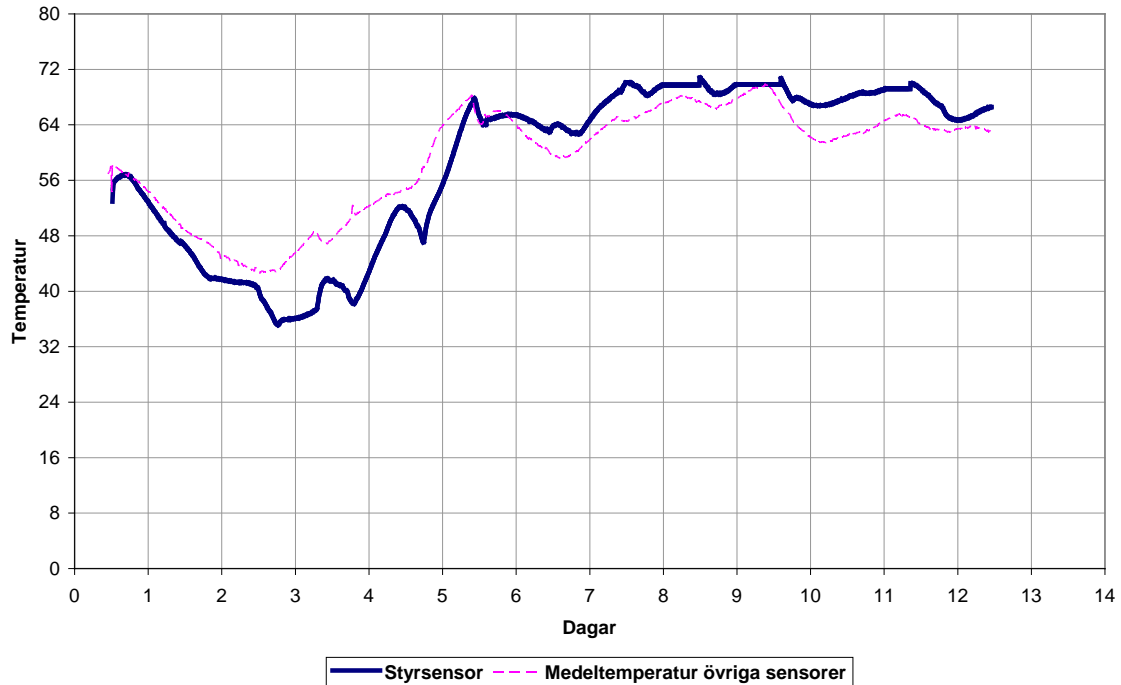
I figur 22 visas medeltemperaturen i sträng 3 tillsammans med fläktningen som var konstant på 100 procent. Här stiger temperaturen över 70 grader och kapaciteten på fläkten är för liten för att hålla ned temperaturen.



**Figur 22.** Temperatur och fläktning i sträng 3.

I figur 23 jämförs temperaturen från styrsensorn i sträng 1 med medelvärdet av övriga temperatursensorer i samma sträng. Den visar att styrsignalen ger ett högre värde i slutet och ett lägre värde i början, men de skiljer sig inte signifikant åt.

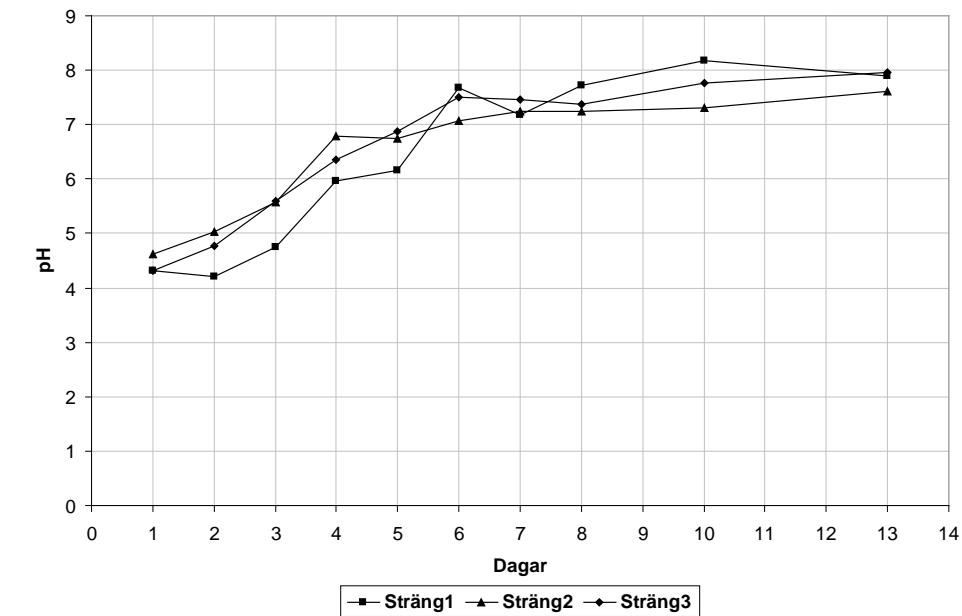




**Figur 23.** Jämförelse mellan temperaturvärdena från styrsensor och medelvärdet från övriga sensorer.

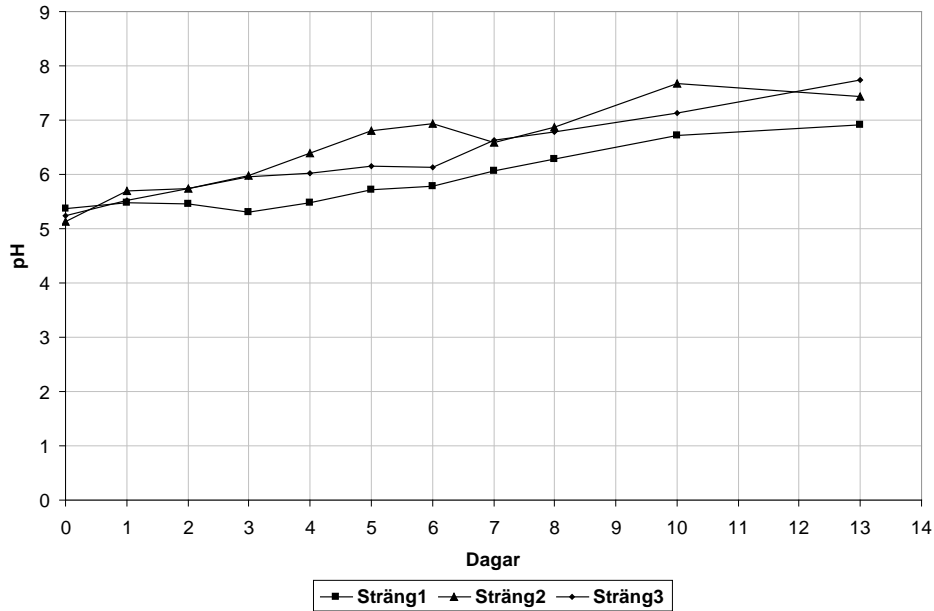
#### 4.2.3 pH

I andra försöket steg inte pH lika snabbt. Sträng 1 översteg pH-värdet 6 efter dag fyra



**Figur 24.** Jämförelse av pH i kondensatet mellan strängarna.

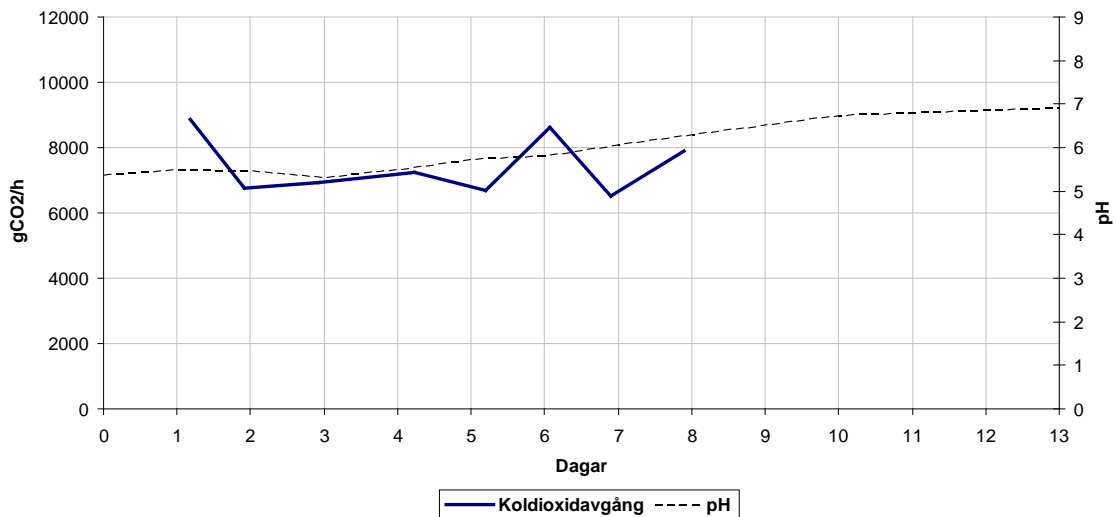
pH-värdet i kompostproverna följde inte riktigt pH-värdet i kondensatet och det steg över 6 i sträng 1 efter sju dagar (figur 25), jämfört med i kondensatet då det steg efter fyra dagar (bilaga 9).



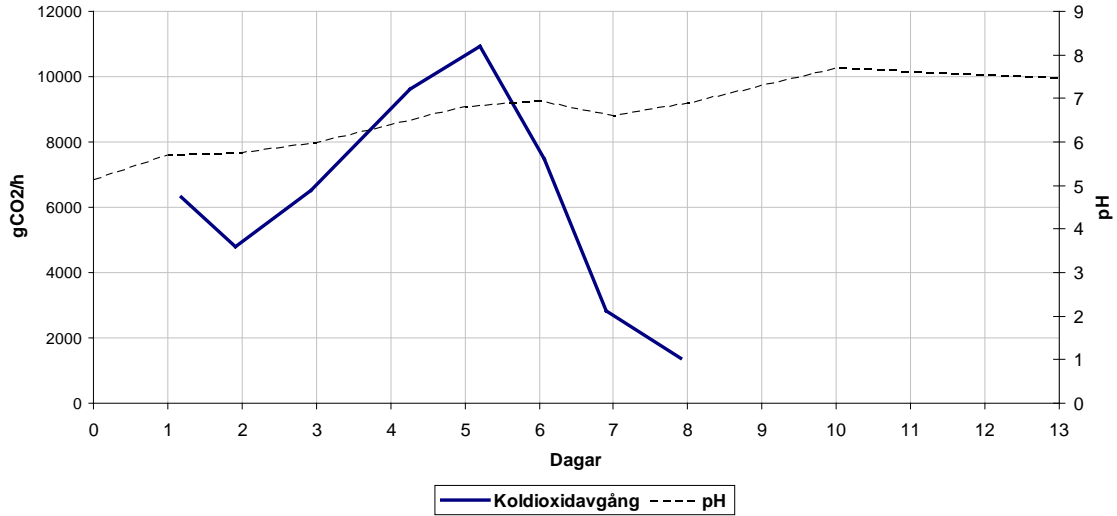
**Figur 25.** Jämförelse av pH mellan strängarna.

#### 4.2.4 Koldioxid

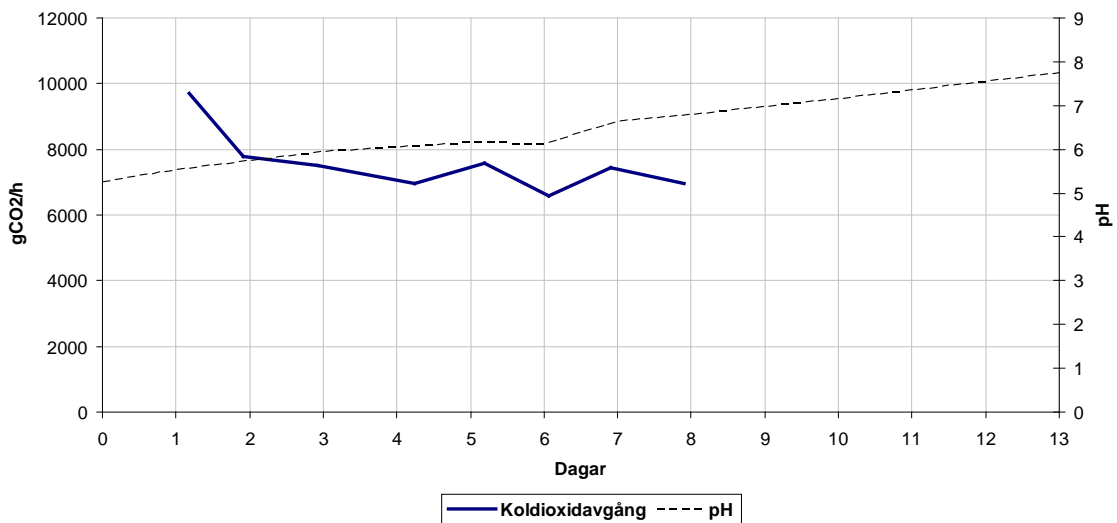
Koldioxidavgången tillsammans med pH för strängarna kan ses i figur 26-28. Värdena från gaskromatografin kan ses i bilaga 12.



**Figur 26.** Koldioxidproduktion och pH i sträng 1.

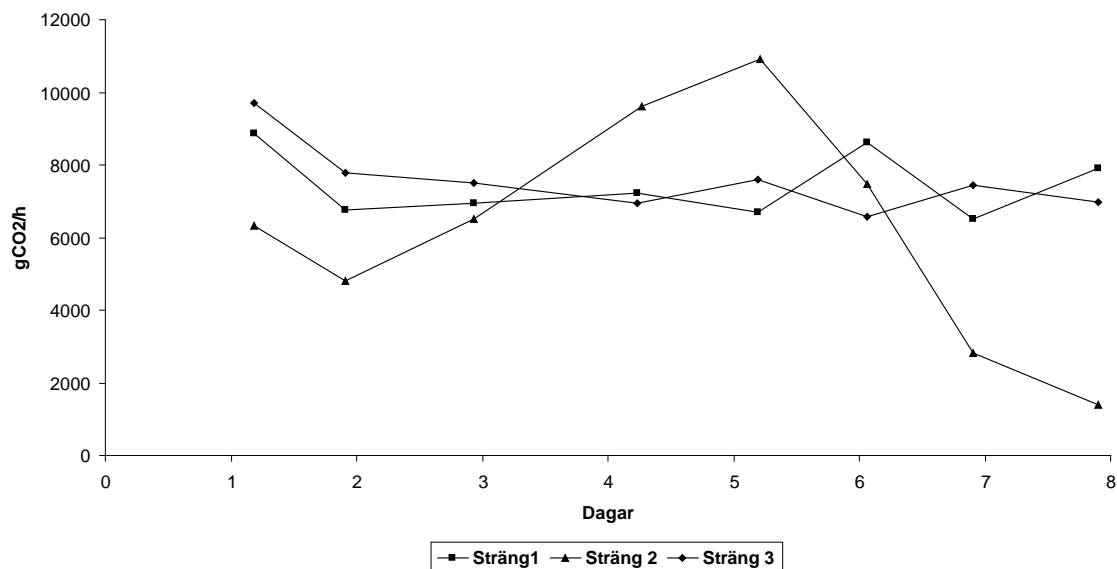


**Figur 27.** Koldioxidproduktion och pH i sträng 2.

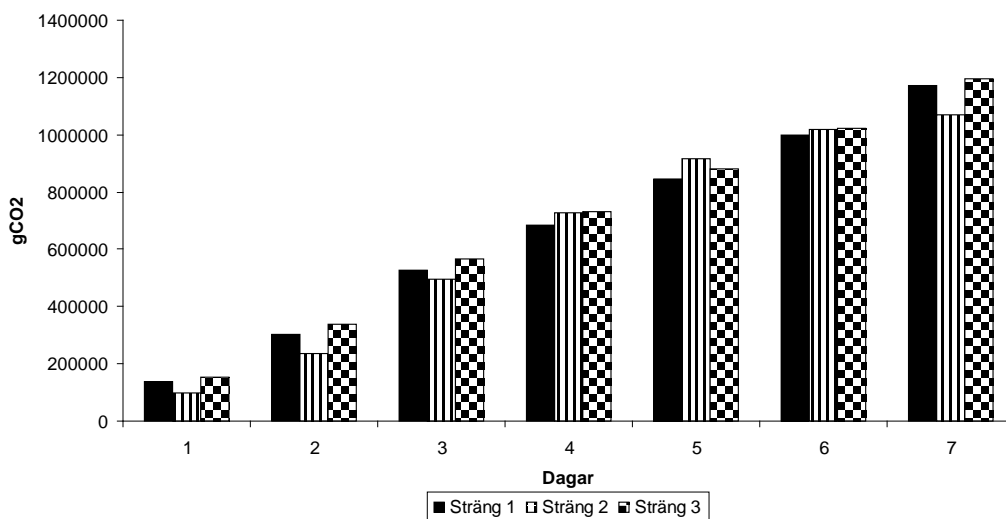


**Figur 28.** Koldioxidproduktion och pH i sträng 3.

Här finns bara koldioxidproduktionen till och med dag 8 och i sträng 2 kan en tydlig ökning av koldioxidproduktionen ses efter att pH stigit över sex. I sträng 1 är en ökning på väg efter pH ökningen. I sträng 3 är inte ökningen av koldioxidproduktionen lika tydlig. I figur 29 jämförs koldioxidavgången mellan strängarna. Även i detta försök är det tydligt att den ackumulerade koldioxidavgången inte skiljer sig mycket mellan de olika strängarna (figur 30).



Figur 29. Jämförelse av koldioxidavgången i strängarna.



Figur 30. Jämförelse av den ackumulerade koldioxidavgången mellan strängarna.

#### 4.2.5 Vattenhalt, torrsubstans och askhalt

Medelvärdena för vattenhalt, torrsubstans och askhalt kan ses i tabell 8. Alla provtagningar redovisas i bilaga 11.

Tabell 8. Medelvärden vattenhalt, askhalt och andel torrsubstans i varje sträng (försök 2).

Dag	Sträng 1			Sträng 2			Sträng 3		
	0	7	22	0	7	22	0	7	22
Vattenhalt [%]	51	47	37	51	51	47	50	51	41
Askhalt [%]	39	40	38	39	43	43	38	41	41
Torrsubstans [%]	49	53	63	49	49	53	50	49	59

Här har kompostmaterialet torkat ut något i sträng 1 och 3. Askhalten ökar och nedbrytning har skett.

#### 4.2.6 Densitet och FAS

I detta försök gjordes mätningar av densitet och FAS både i början och i slutet av försöket (tabell 9 och 10).

**Tabell 9.** Densitet och FAS dag 1 (försök 2).

Hink (10 dm <sup>3</sup> ) [kg]	Full hink [kg]	Full hink + H <sub>2</sub> O [kg]	Densitet [kg/dm <sup>3</sup> ]	FAS [%]
0,34	4,82	10,87	0,45	61

**Tabell 10.** Densitet och FAS dag 14 (försök 2).

Hink (10 dm <sup>3</sup> ) [kg]	Full hink [kg]	Full hink + H <sub>2</sub> O [kg]	Densitet [kg/dm <sup>3</sup> ]	FAS [%]
0,34	4,37	10,50	0,44	61

Tabellerna visar att det är ungefär samma densitet och luftporvolym i början som i slutet av försöksperioden.

#### 4.2.7 Elförbrukning

Elförbrukningen för andra försöket kan ses i tabell 11.

**Tabell 11.** Elförbrukningen för fläktarna efter 21 dagar (försök 2).

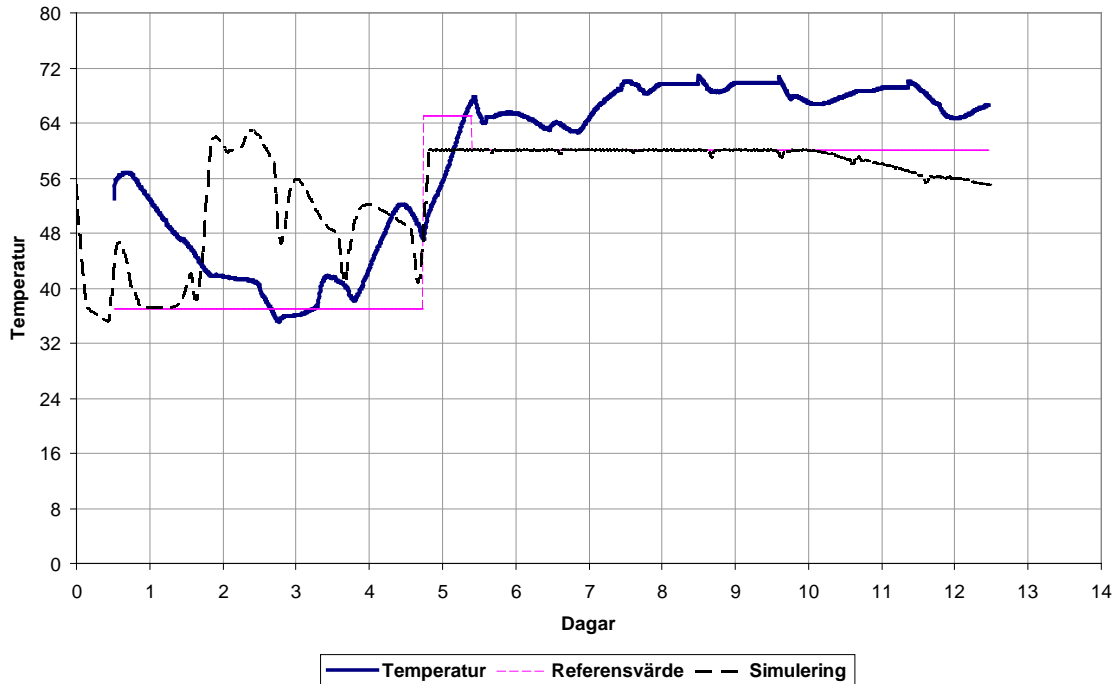
	Fläkt 1	Fläkt 2	Fläkt 3
Motor [kW]	0,5	0,21	0,21
Elförbrukning [kWh]	209	-	98,8

På grund av att fläkten gick sönder i sträng 2 dag 16 kunde inte elförbrukningen läsas av korrekt. I stället beräknades den ungefärliga elförbrukningen fram till dess att fläkten gick sönder. Detta kunde göras eftersom fläkttiden är registrerad i kontrollprogrammet. Den genomsnittliga energiförbrukningen per minut kunde lätt beräknas från tidigare data genom att ta den använda energin för försök 1 dividerat med totala antalet minuter fläkten stod på ( $87,6 \text{ [kWh]} / 24936,17 \text{ [min]} = 0,003513 \text{ kWh/min}$ ). Detta gav resultatet att fläkt 2 hade förbrukat 49,5 kWh under försök 2 till och med dag 16. För att kontrollera att metoden går bra att använda beräknades även energiförbrukningen för fläkt 3. Den visade sig bli 102,8 och hamnar i samma härad som den verkliga förbrukningen på 98,8 (enligt tabell 9). Den ungefärliga energiförbrukningen för fläkt 3 till och med dag 16 är 79,1 kWh, 37,4 % mindre än fläkt 2.

För att jämföra första strängen med en likadan fläkt som varit påslagen hela tiden beräknades energin per minut som fläkten dragit och multiplicerades med det totala antalet minuter som försöket pågick. Resultatet blev att om sträng 1 hade körts utan styrning så skulle den dragit cirka 253 kWh. Så teoretiskt sett har styrningen sparat in drygt 17 % av elförbrukningen i sträng 1.

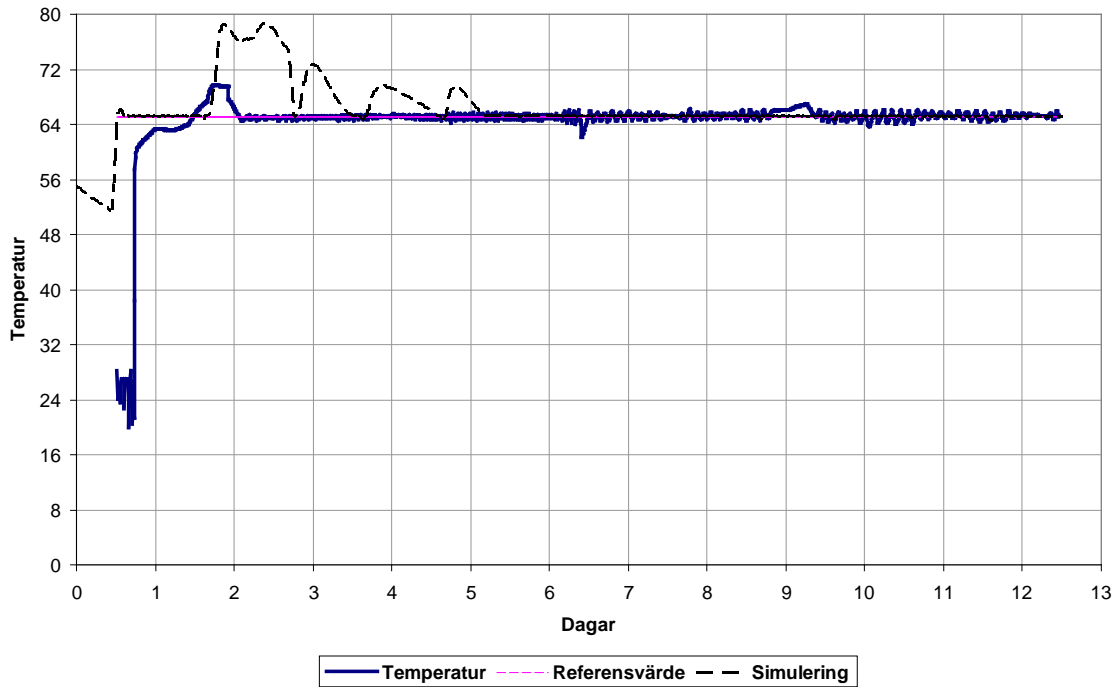
### 4.3 MODELLVALIDERING

Eftersom modellen grundar sig på ett försök som gjorts i en kompostreaktor så finns det en stor felkälla där eftersom det inte går att återskapa exakt samma förutsättningar i en storskalig kompostering, såsom vattenhalt, pH-värde och temperatur. Följande resultat fås om försök 2 imiteras med avseende på kompostmassa, antal dagar, fläktkapacitet, initial komposttemperatur, utomhustemperatur och referensvärden (figur 31-32).



**Figur 31.** Jämförelse mellan den simulerade temperaturen och den reella i sträng 1, försök 2.

Den stora skillnaden är att i simuleringen klarar inte fläkten av att hålla nere temperaturen i början. Sedan håller den referensvärdet tills i slutet då temperaturen sjunker.



**Figur 32.** Jämförelse mellan den simulerade temperaturen och den reella i sträng 2, försök 2.

Simuleringen för den andra strängen är ganska bra, just när temperaturen stiger över referensvärdet blir det en översläng i båda kurvorna, dock inte så mycket i det verkliga fallet. Överslängen i början för simuleringen tyder på att det är en för hög nedbrytningshastighet i den mest intensiva fasen i modellen. Detta är enligt förväntningarna eftersom den fasen blir kortare och intensivare i en reaktor med bra luftning och homogena förhållanden, vilket var vad som användes i konstruktionen av modellen. Simuleringen överensstämmer ganska bra med verkligheten och parametrarna till PID-regulatorn kan antas vara goda. För att ytterligare få bättre precision i simuleringen kan hänsyn tas till bland annat pH-värde och vattenhalt i komposten.

## 5. DISKUSSION

Kompostprocessen i strängarna fungerade bra och luftmängden var tillräcklig för att få en pH-ökning och en bra nedbrytning. Temperaturerna var något högre än vad som är optimalt enligt teorin och fläktarna kunde inte kyla så mycket i början. I sträng 1 kunde inte temperaturen hållas ned som planerat (figur 10), det vill säga hålla temperaturen under 40 grader tills pH-värdet stigit över 6 och sedan höja referensvärdet till 60 grader. I det andra försöket kortades strängarna ned till hälften och sträng 1 hade en bra styrning dag 2 till 4 med en temperatur på cirka 40 grader. Sedan stiger temperaturen över 70 grader under dagarna 8 till 12 vilket tyder på sämre luftning med tiden. Det kan bero på att fåglar går hål i ensilageplasten så att luften sugas in därifrån istället för att transporteras underifrån genom kompostmaterialet. Eftersom temperaturen inte kunde hållas under 40 grader innan pH-värdet steg över 6 blir det svårt att dra en slutsats om det är bra att hålla ned temperaturen i början eller inte.

I sträng 2 var styrningen mycket bra under andra försöket och tillförda luftmängden var bättre dimensionerad, jämfört med försök 1, för att hålla ett referensvärde på 65 grader (figur 21). Det skulle vara bättre om fläkten hade blåst för fullt i början eftersom den ackumulerade koldioxidavgången är mindre än övriga strängar till en början (figur 30).

Det positiva som kunde lyftas fram var att det gick att spara en del energi genom att ha en styrning på fläkten. Detta eftersom sträng 2 som har likadan fläkt som sträng 3 gav upphov till ungefär samma koldioxidavgång. Skulle koldioxidavgången vara mindre i sträng 2 kan inte en slutsats om besparing dras eftersom kompostprocessen försämras. Det visade sig att sträng 3 utan styrning hade ungefär lika stor ackumulerad koldioxidavgång som sträng 1 med styrning (figur 19 och 30). Sträng 1 hade dessutom en mer krävande fläkt och drog mer energi (tabell 6 och 11). Elbesparingspotentialen är som störst under den senare delen av processen när aktiviteten går ner och inte lika mycket luftning behövs. I försök 1 var skillnaden i elförbrukning för sträng 2 och 3 cirka 10 %. Under försök 2 gick det att hålla temperaturen kring referensvärdet och därmed reglerades fläkten mer (figur 21). Detta syntes inte minst av att elbesparingen jämfört med sträng 3 blev cirka 37 %.

Det har varit problem vid kallare årstider att få upp temperaturen i strängarna. Då har det hänt att fläktarna stängts av manuellt. När ingen luft alls strömmar genom komposten finns risk att den blir anaerob. Där skulle styrningen kunna komma in och hela tiden gå på en miniminivå, och därmed ge lagom mycket luft utan att kyla för mycket.

Vattenhalten var oförändrad i första försöket och tyder på att fläktarna inte torkar ut materialet. I andra försöket kunde en viss uttorkning ske i sträng 1 och 3. Anledningen kan vara mindre kompostmassa. Att nedbrytning har skett i båda försöken indikeras av en ökande askhalt i materialet (Tabell 4 och 8).

I båda försöken kunde det påvisas att när pH-värdet stiger över 6 sker en ökning i koldioxidproduktionen. Detta bekräftar teorier från Smårs (2005), se kapitel 2.1.2. Vid tidigare examensarbete ute vid Hovgården har det vid ett tillfälle varit svårt att få upp pH-värdet (Jonsson, 2008). I denna studie har pH stigit i alla försök vilket kan vara kopplat



till att det var tillräcklig luftning av komposten och tillräckligt högt pH-värde vid starten. Luftflödet per ton ingående material är således tillräcklig (tabell 3 och 7) och kan jämföras med kravet för god process med snabb pH-stigning som är minst 10 kubikmeter per timme och ton ingående material (Sundberg et al. 2008). Att pH-värdet steg kan innebära att koncentrationen av dålig lukt minskades. Ett lågt pH-värde är förknippat med en risk för hög luktkoncentration (Sundberg et al, 2008).

Modellen som gjordes i Simulink för att simulera temperaturen i komposten fungerade ganska bra och regleringen som PID-parametrarna gav upphov till har även den gått bra i det fall där luftmängderna var tillräckliga (sträng 2 försök 2, figur 21) Det som kan förbättras mer i modellen är att ta hänsyn till bland annat fuktigheten i komposten, utomhustemperatur och pH.

För framtida undersökningar kan det vara intressant att undersöka om det är möjligt att ta vara på den värmeenergi som transporteras ut från fläktarna. Det kan vara 70 grader varm luft med 100 % luftfuktighet som strömmar ut från komposten. Hur den energin kan tas tillvara på är en intressant fråga.

Metangas kan utvecklas om det uppstår anaeroba förhållanden i komposten. Denna är en stark växthusgas och att hålla nere växthusgasemissioner kan vara en viktig miljöfråga. Genom att använda biofilter vid den utströmmande luften skulle metangasen kunna filtreras bort samtidigt som dålig lukt renas.

## 6. SLUTSATSER

Själva kompostprocessen fungerade bra i alla strängar eftersom en nedbrytning påvisats och temperaturen stigit på grund av mikroorganismernas aktivitet. Kompostprocessen förbättrades inte mycket av att ha en starkare fläktning, i detta fall en kapacitet på 1360 m<sup>3</sup>/h till cirka 43 ton kompost jämfört med cirka 500 m<sup>3</sup>/h. Det var svårt att hålla ned temperaturen under 40 grader tills pH har stigit över 6.

I detta experiment visade det sig att alla strängar hade ungefär lika stor ackumulerad koldioxidavgång, det vill säga lika stor nedbrytning under processen. Reglerstrategin för sträng 2 var att föredra, åtminstone efter att pH stigit över 6, eftersom energi kan sparas in under senare delen av processen.

Vintertid kan det vara svårt att få upp temperaturen i komposten och en möjlighet är att styrningen skulle komma bra till pass och att fläktarna då inte behöver stängas av manuellt.

## 7. REFERENSER

Alm G., Eriksson G., Ljunggren H., Palmstierna I., Tiberg N. (1991). Kompostboken. LTs förlag Stockholm. ISBN 91-36-03092-9

Bågstam G. (1978). Composting of spruce-bark under controlled conditions. Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm. Institutionen för biokemi och biokemisk teknologi.

Chiumenti A., Chiumenti R., Diaz L., Savage G., Eggerth L., Goldstein N. (2005). Modern composting technologies. USA. The JG Press, Inc. ISBN 0-932424-29-5.

Eklind Y. (1998). Carbon and nitrogen turnover during composting and quality of the compost product. Doktorsavhandling, SLU, Uppsala. Institutionen för Markvetenskap. Serie Acta Universitatis agriculturae Sueciae. 93. ISBN 91-576-5546-4

Haug. P.T. (1993). The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis. Boca Raton, Florida, USA. ISBN 0-87371-373-7.

Hovsenius G. (1979). Kemiska egenskaper hos hushållsavfall, slam och kompost. Rapport från statens naturvårdsverk, forskningsnämnden. Kontrakt nr. 7-155/77. Serie SNV PM, 1096. Libertryck Stockholm 1979 952507. ISBN 91-7590-003-3.

Hovsenius G., Moreno L., Setterwall F. (1978). Utomhus kompostering av homogeniserat hushållsavfall genom påtvingad luftning. Rapport från statens naturvårdsverk, forskningsnämnden. Kontrakt nr. 7-155/76-77. Serie SNV PM, 1024. Libertryck Stockholm 1978 852111

Johansson P., Svensson A. (1999). Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer. Forskningsrådet Formas och författarna, Stockholm, ISBN 978-91-540-6001-6

Jonsson E. (2008). Luftningens inverkan vid storskalig sluten kompostering. Examensarbete, SLU institutionen för markvetenskap, examens och seminariearbete nr. 95. Uppsala 2009. ISSN 1102-1381

Lens P., Hamelers B., Hoitink H., Bidlingmaier W. (2004). Resource recovery and reuse in organic solid waste management. IWA Publishing. Padstow, Cornwall, UK. ISBN 1 84339 054 X

Miller. F.C. (1996). Composting of municipal solid waste and its components. I: Palmisano. A.C., Barlaz. M.A. Microbiology of Solid Waste. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. s.115-154.

Moreno L. (1982). Composting household refuse by forced aeration. Royal Institute of Technology Department of Chemical Engineering S – 100 44 Stockholm.

Sandström M. (2008). Storskalig kompostering av hushållsavfall. Examensarbete, Teknisk biologi, Umeå universitet.

Smårs S., Gustafsson L., Beck-Friis B., Jönsson H. (2002). Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control. *Bioresource Technology* 84 (2002) 237-241. SLU, Uppsala. Department of Agricultural Engineering.

Sonesson. U. (1998). Systems analysis of waste management – the ORWARE model, transport and compost sub-models. Doktorsavhandling, SLU, Uppsala. Department of Agricultural Engineering. *Serie Acta Universitatis agriculturae Sueciae*. 130. ISBN 91-576-5470-0

Sundberg C., Jönsson H. (2008). Minimering av lukt från kompostering av matavfall genom processoptimering. Ett nordiskt samarbetsprojekt. Rapport Avfall Sverige Utveckling 2008:10. Malmö. ISSN 1103-4092.

Sundberg. C. (2005). Improving compost process efficiency by controlling aeration, temperature and pH. Doktorsavhandling, SLU, Uppsala. Department of Biometry and Engineering. *Serie Acta Universitatis agriculturae Sueciae*. 2005:103. ISBN 91-576-6902-3.

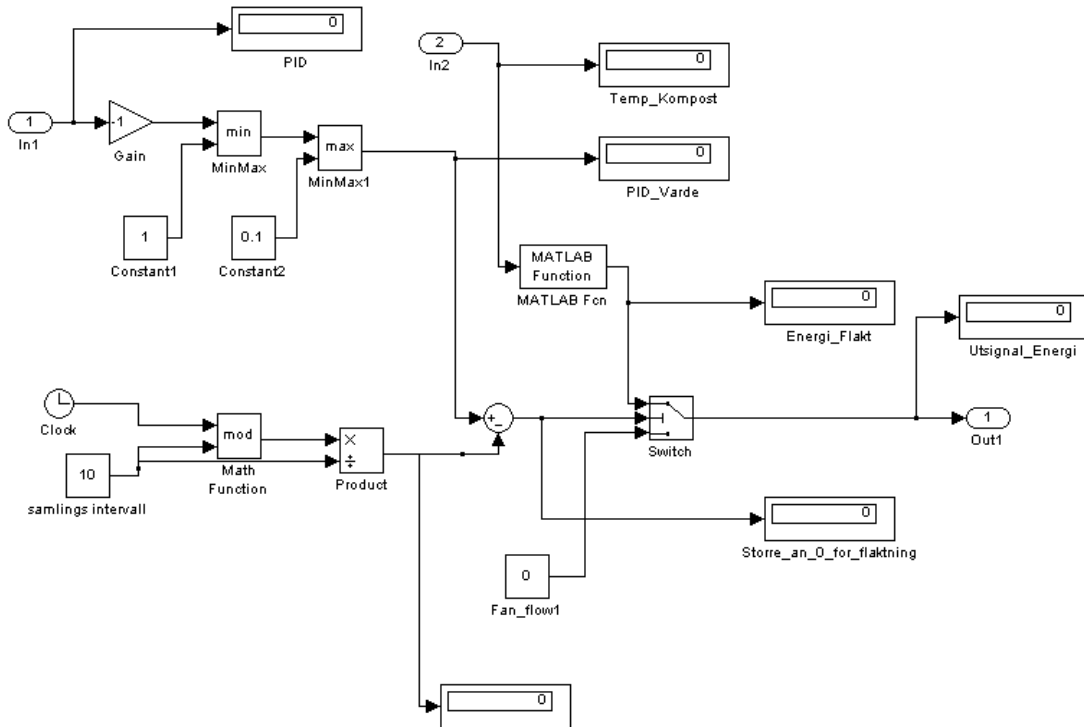
Sundberg, C., M. Romantschuk, S. Smårs and H. Jönsson (2008). Minimering av lukt från kompostering av matavfall genom processoptimering - Ett nordiskt samarbetsprojekt. Malmö, Avfall Sverige utveckling: 2008:10.

[http://chaos.bibul.slu.se/sll/slu/rapport\\_mikrobiologi/RMB61/RMB61.HTM](http://chaos.bibul.slu.se/sll/slu/rapport_mikrobiologi/RMB61/RMB61.HTM)

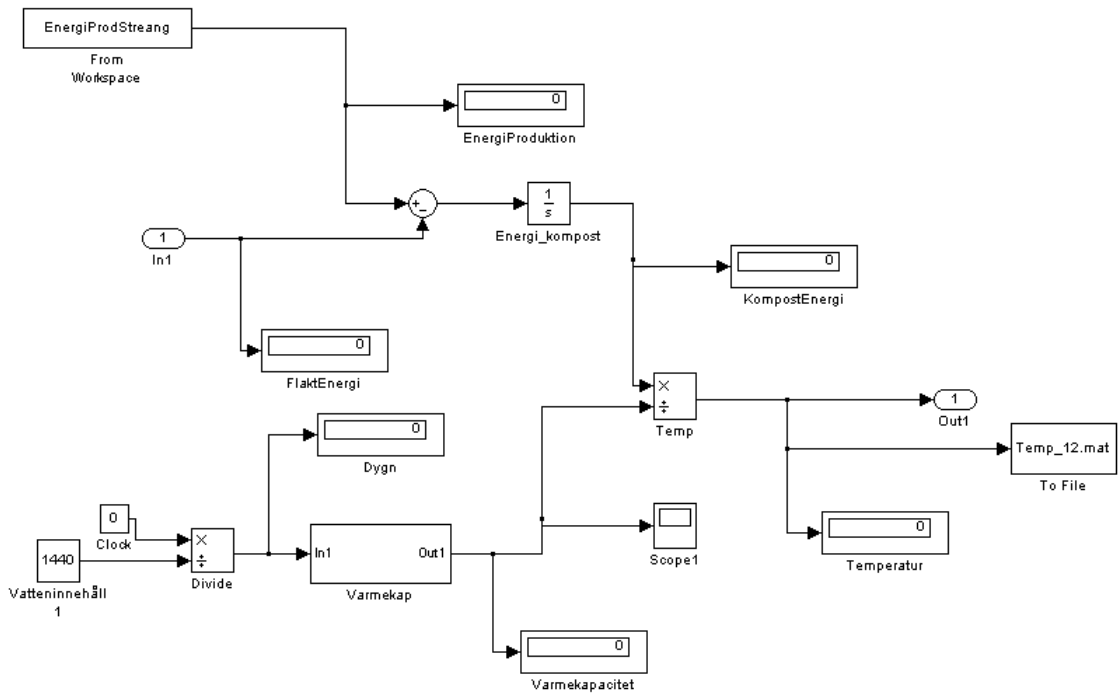
<http://www-vaxten.slu.se/marken/torrsubstans.htm>

## 8. BILAGOR

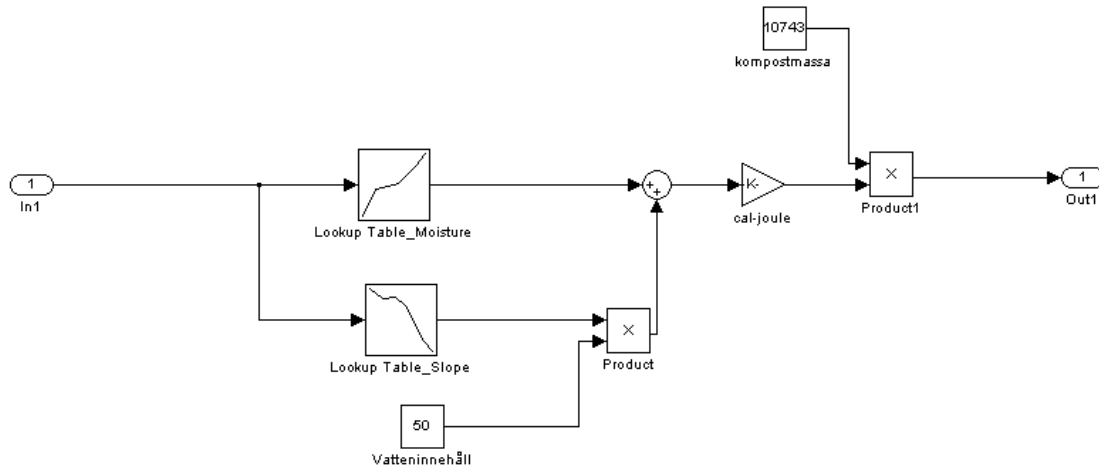
### Bilaga 1. Fläktsystem i kompostmodell



### Bilaga 2. Kompostprocess i kompostmodell



### Bilaga 3. Specifik värmekapacitet i kompostmodell



### Bilaga 4. Funktionen entalpi

```
function [Diff] = entalpi(t)
tempin = 15; %Ange utomhustemperaturen [°C]
Q = 1356; %Ange fläktens maximala kapacitet [m3/h]
temp = t + 273.15; %Temperaturen i Kelvin i ekvationen för ångans
mättningsstryck

%Konstanter
R_asae=22105649.25;
A=-27405.526;
B=97.5413;
C=-0.146244;
D=0.12558e-3;
E=-0.48502e-7;
F=4.34903;
G=0.39381e-2;

%Beräknar ångans mättningsstryck i luft vid en given temperatur ut ur
komposten, (från Sven Smårs experiment)
Ps_ut = R_asae*exp((A+B*temp+C*temp.^2+D*temp.^3+E*temp.^4)./(F*temp-
G*temp.^2));

%Beräkna vattenånga i 1 kg torr luft
H = 0.622;
P = 101325; %atmosfäriskt tryck i Pascal
Phi_ut = 1; %relativ fuktighet ut från komposten

X_ut = H*Phi_ut*Ps_ut/(P-Phi_ut*Ps_ut);

%Beräkna specifik entalpi som ett mått på energin in i komposten.
Cpl = 1005; %Luftens specifika värmekapacitet [J/(Kg*°C)], s.77 Data och
diagram
Lvo = 2260000; %Specifik ångbildningsentalpi vid 0°C smälttemperatur
[J/Kg], s.75
Cpw = 1859; %Ångans specifika värmekapacitet vid 0°C [J/(Kg*°C)], s.76
```

```

H_ut = Cpl*t + X_ut*(Lvo + Cpw*t); %[J/Kg]

%Beräknar ångans mättningsstryck i ingående luft
temp_in = tempin+273.15; %Utomhustemperaturen i Kelvin
temp_entalpi = tempin;

Ps_in=R_asae*exp((A+B*temp_in+C*temp_in.^2+D*temp_in.^3+E*temp_in.^4)./(
F*temp_in-G*temp_in.^2));

%Beräkna vattenånga i 1 kg torr luft
Phi_in = 0.9; %relativ fuktighet in till komposten

X_in = H*Phi_in*Ps_in/(P-Phi_in*Ps_in);

%Beräkna specifik entalpi som ett mått på energin in i komposten.
H_in = Cpl*temp_entalpi + X_in*(Lvo + Cpw*temp_entalpi); %[J/Kg]

%Beräkna skillnaden mellan ingående och utgående energi i fuktig luft
genom
%komposten
Skillnad = H_ut - H_in;

%Gör om till [J/min]
Q_flakt = Q/60; %Flöde från fläkt [m3/min]
dens = 1.1; %[Kg/m3]
massflode = Q_flakt*dens; %[Kg/min]

Diff = 0.001*Skillnad*massflode; %Energi [KJ/min]

```

#### Bilaga 5. pH-värden i kompostprover (försök 1)

Datum	2009-04-06	2009-04-07	2009-04-08	2009-04-09	2009-04-10	2009-04-11	2009-04-12	2009-04-13	2009-04-14	2009-04-23	2009-04-27
dagar	0	1	2	3	4	5	6	7	8	17	21
1 A I	5,62	-	6,19	6,61	8,32	8,03	8,11	8,28	8,2	-	7,6
1 A II	5,46	-	5,4	6,39	6,15	6,65	7,1	6,07	-	8,4	8,57
1 A III	5,52	-	5,3	5,49	7,93	5,76	6,66	7,04	8,5	-	8,24
1 B I	5,14	-	5,78	6,71	7,71	8,19	7,31	8,29	8,3	-	8,1
1 B II	5,21	5,73	6,28	7,34	8,68	8,62	8,31	8,47	-	8,26	8,59
1 B III	5,48	6,05	6,09	8,13	8,5	8,7	6,6	8,4	8,6	-	8,6
1 C I	5,74	-	6,69	7,24	8,04	8,57	8,48	8,55	8,5	-	8,24
1 C II	5,98	-	6,18	5,98	7,87	8,45	8,77	8,64	-	8,11	8,15

<b>1 C III</b>	5,91	-	6,42	6,4	8,45	7,15	8,25	7,48	8,4	-	8,93
<b>2 A I</b>	5,52	-	6,04	6,85	8,78	8,44	8,6	8,63	8,7	-	8,04
<b>2 A II</b>	5,3	-	5,34	5,76	7,65	8,32	8,35	8,6	-	8,82	8,45
<b>2 A III</b>	5,16	-	5,17	5,35	5,04	6,7	5,1	8,2	8,1	-	8,42
<b>2 B I</b>	5,26	-	5,6	6,63	7,54	8,36	8,29	-	8,5	-	8,22
<b>2 B II</b>	5,12	5,51	5,8	5,74	6,26	8,61	8,42	7,24	-	8,53	8,35
<b>2 B III</b>	5,18	5,1	7,27	6,35	8,22	6,24	8,46	8,54	8,8	-	8,82
<b>2 C I</b>	5,97	-	5,55	6,05	8,7	8,51	8,41	7,82	8,4	-	8,19
<b>2 C II</b>	4,96	-	5,6	5,74	6,32	8,36	6,54	8,15	-	8,43	8,22
<b>2 C III</b>	5,24	-	5,53	6,16	6,41	7,62	7,97	8,65	8,7	-	8,92
<b>3 A I</b>	4,95	-	5,73	6,65	5,73	8,04	8,08	7,55	8,1	-	8,26
<b>3 A II</b>	5,08	-	5,54	5	7,29	7,03	6,72	7,24	-	8,67	8,75
<b>3 A III</b>	5,01	-	5,25	5,07	6,32	5,96	6,55	-	6,1	-	8,6
<b>3 B I</b>	-	-	5,57	5,74	7,34	6,07	6,21	-	6,7	-	8,43
<b>3 B II</b>	5,86	5,16	5,59	6,4	5,16	6,23	7,72	8,58	-	8,75	7,06
<b>3 B III</b>	5,3	5,47	5,3	7,5	7,17	6,3	6,06	9,05	8,5	-	6,9
<b>3 C I</b>	5,38	-	5,21	5,99	5,25	5,73	6,25	5,66	5,3	-	8,24
<b>3 C II</b>	5,2	-	6,03	6,49	7,63	7,27	7,76	-	-	8,06	7,82
<b>3 C III</b>	5,26	-	6,31	7,6	8,33	6,93	7,34	-	8,5	-	8,28

**Bilaga 6. pH-värden i kondensat (försök 1)**

<b>Datum</b>	<b>2009-04-07</b>	<b>2009-04-08</b>	<b>2009-04-09</b>	<b>2009-04-10</b>	<b>2009-04-11</b>	<b>2009-04-12</b>	<b>2009-04-13</b>	<b>2009-04-14</b>	<b>2009-04-23</b>
<b> dagar</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>17</b>
<b>Fläkt 1</b>	4,33	4,03	8,13	8,31	8,36	8,21	8,04	8,39	8,33
<b>Fläkt 2</b>	4,03	3,42	5,6	6,7	7,45	7,84	7,85	8,14	8,5
<b>Fläkt 3</b>	3,75	3,29	4,55	6,09	7,24	7,64	7,7	7,92	7,97



**Bilaga 7. Vattenhalt, torrsubstans och askhalt (försök 1)**

<b>Datum</b>	<b>2009-04-06</b>	<b>2009-04-14</b>	<b>2009-04-27</b>	<b>2009-04-06</b>	<b>2009-04-14</b>	<b>2009-04-27</b>	<b>2009-04-06</b>	<b>2009-04-14</b>	<b>2009-04-27</b>
<b> dagar</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>21</b>
<b>Analys</b>	<b>Vattenhalt</b>			<b>Torrsubstans</b>			<b>Askhalt</b>		
<b>1 A I</b>	0,59	0,48	0,27	0,41	0,52	0,73	0,39	0,42	0,52
<b>1 A II</b>	0,62	0,57	0,58	0,38	0,43	0,42	0,41	0,38	0,41
<b>1 A III</b>	0,6	0,66	0,7	0,4	0,34	0,3	0,4	0,43	0,46
<b>1 B I</b>	0,61	0,57	-	0,39	0,43	-	0,35	0,4	-
<b>1 B II</b>	0,62	0,8	0,64	0,38	0,2	0,36	0,34	0,51	0,44
<b>1 B III</b>	0,62	0,68	0,68	0,38	0,32	0,32	0,37	0,4	0,54
<b>1 C I</b>	0,61	0,57	0,64	0,39	0,43	0,36	0,43	0,49	0,42
<b>1 C II</b>	0,62	0,65	0,57	0,38	0,35	0,43	0,33	0,46	0,42
<b>1 C III</b>	0,58	0,68	0,68	0,42	0,32	0,32	-	0,38	0,45
<b>2 A I</b>	0,6	0,54	0,59	0,4	0,46	0,41	-	0,38	0,46
<b>2 A II</b>	0,61	0,58	0,54	0,39	0,42	0,46	0,34	0,38	0,44
<b>2 A III</b>	0,59	0,65	0,73	0,41	0,35	0,27	0,38	0,36	0,39
<b>2 B I</b>	0,54	0,47	-	0,46	0,53	-	0,41	0,38	-
<b>2 B II</b>	0,6	0,64	0,55	0,4	0,36	0,45	0,32	0,35	0,38
<b>2 B III</b>	0,55	0,72	0,72	0,45	0,28	0,28	0,25	0,36	0,41
<b>2 C I</b>	0,65	0,69	0,54	0,35	0,31	0,46	0,34	0,37	0,4
<b>2 C II</b>	0,62	0,48	0,42	0,38	0,52	0,58	0,32	0,45	0,45
<b>2 C III</b>	0,62	0,6	0,66	0,38	0,4	0,34	0,35	0,46	0,46
<b>3 A I</b>	0,62	0,52	0,75	0,38	0,48	0,25	0,32	0,39	0,36
<b>3 A II</b>	0,58	0,52	0,6	0,42	0,48	0,4	0,33	0,37	0,42
<b>3 A III</b>	0,62	0,69	0,63	0,38	0,31	0,37	0,37	0,33	0,45
<b>3 B I</b>	-	0,54	-	-	0,46	-	-	0,33	-
<b>3 B II</b>	0,59	0,5	-	0,41	0,5	-	0,34	0,45	-

<b>3 B III</b>	0,61	0,67	0,69	0,39	0,33	0,31	-	0,4	0,38
<b>3 C I</b>	0,6	0,62	0,63	0,4	0,38	0,37	0,42	0,3	0,46
<b>3 C II</b>	0,58	0,46	0,58	0,42	0,54	0,42	0,37	0,45	0,46
<b>3 C III</b>	0,59	0,62	0,67	0,41	0,38	0,33	0,31	0,47	0,45

**Bilaga 8. Koldioxid [ppm] (försök 1)**

	<b>Sträng 1</b>	<b>Sträng 2</b>	<b>Sträng 3</b>
<b>2009-04-07</b>	27020,76	32685,59	24517,62
<b>2009-04-08</b>	10927,29	48333,73	28244,85
<b>2009-04-09</b>	13384,08	99787,72	22194,36
<b>2009-04-10</b>	99973,92	56046,82	24521,53
<b>2009-04-11</b>	45224,1	20387,37	25089,27
<b>2009-04-12</b>	7607,717	22519,97	28323,44
<b>2009-04-13</b>	67362,7	17910,24	29515,3
<b>2009-04-14</b>	7764,395	18723,43	20500,18
<b>2009-04-16</b>	2579,042	12188,3	20688,1
<b>2009-04-19</b>	6907,178	10104,9	14052,02
<b>2009-04-23</b>	6172,746	9111,8	11884,37
<b>2009-04-27</b>	2852,55	-	11593,54

**Bilaga 9. pH-värden kompostprover (försök 2)**

<b>Datum</b>	<b>2009-05-12</b>	<b>2009-05-13</b>	<b>2009-05-14</b>	<b>2009-05-15</b>	<b>2009-05-16</b>	<b>2009-05-17</b>	<b>2009-05-18</b>	<b>2009-05-19</b>	<b>2009-05-20</b>	<b>2009-05-22</b>	<b>2009-05-25</b>
<b> dagar</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>13</b>
<b>1 A I</b>	5,25	5,49	5,59	5,34	5,64	6,06	5,65	6,5	5,6	6,11	6,54
<b>1 A II</b>	5,3	5,74	5,45	5,11	5,82	6,16	5,79	5,5	7,3	5,34	6,5
<b>1 A III</b>	5,4	5,51	5,34	5,41	5,34	6,66	7,3	7,77	7,5	8,8	8,4
<b>1 B I</b>	5,29	5,77	5,7	5,53	6,21	6,05	5,77	5,66	6,15	6,5	6,45

<b>1 B II</b>	5,9	5,29	5,2	5,17	5,34	5,23	5,39	5,28	5,5	6,05	6,6
<b>1 B III</b>	5,44	5,23	5,14	5	5,1	5,25	5,27	5,34	7,2	8,4	8,15
<b>1 C I</b>	5,28	5,56	5,98	5,4	5,3	5,55	6,03	6,2	5,67	5,75	6,53
<b>1 C II</b>	5,12	5,57	5,33	5,12	5,31	5,2	5,22	5,7	5,75	5,25	6,32
<b>1 C III</b>	5,26	5,23	5,37	5,74	5,26	5,37	5,66	6,59	5,88	8,3	6,68
<b>2 A I</b>	5,12	5,67	6,11	6,12	6,21	6,79	6,61	5,93	5,49	5,57	7,54
<b>2 A II</b>	5,02	5,58	5,42	5,24	5,68	5,7	6,2	7	6,46	7	7,5
<b>2 A III</b>	5	5,58	5,82	6,39	7,12	7,02	7,3	7	7,25	8,3	6,88
<b>2 B I</b>	5,35	5,77	6,06	6,72	7,98	7,48	7,09	7,15	7,3	7,6	7,49
<b>2 B II</b>	5,03	5,5	6,03	7,76	8,07	8,12	8,05	7,5	7,9	8,6	8,07
<b>2 B III</b>	5	5,47	6,15	5,78	5,75	6,04	7,17	5,71	7,05	7,5	7,18
<b>2 C I</b>	5	5,77	5,44	5,33	5,16	5,27	6,4	5,6	7,25	7,79	7,54
<b>2 C II</b>	5,3	5,74	5,29	5,28	5,92	6,82	6,24	6,8	6,85	8,44	7,7
<b>2 C III</b>	5,27	6,24	5,28	5,18	5,59	7,97	7,3	6,55	6,37	8,31	7,11
<b>3 A I</b>	5,48	5,88	5,3	5,59	5,47	5,4	5,61	5,8	6,62	7,86	6,95
<b>3 A II</b>	5,31	5,33	5,53	5,43	5,32	5,29	5,6	5,6	5,7	6,09	6,5
<b>3 A III</b>	5,06	5,77	6,4	7,27	6,12	5,26	6,05	7,26	8	5,02	8,58
<b>3 B I</b>	5,21	5,42	6	5,91	5,69	5,34	5,76	5,85	6,75	7,21	8,13
<b>3 B II</b>	5,08	5,56	5,9	5,48	5,93	5,74	5,84	7,17	5,5	8	8,1
<b>3 B III</b>	5,25	5,2	5,51	7,48	6,36	7,26	6,7	7,26	7,4	8,13	8,55
<b>3 C I</b>	5,21	5,42	5,79	5,57	6,03	7,14	7,03	7,25	7,4	7,67	7,56
<b>3 C II</b>	5,2	5,58	6,03	5,59	7,22	6,83	5,47	6,12	6,71	6,05	7,91
<b>3 C III</b>	5,3	5,52	5,37	5,2	6,14	7,11	7,05	7,44	6,95	8,22	7,47

**Bilaga 10.** pH-värden i kondensat (försök 2)

Datum	2009-05-13	2009-05-14	2009-05-15	2009-05-16	2009-05-17	2009-05-18	2009-05-19	2009-05-20	2009-05-22	2009-05-25
Dagar	1	2	3	4	5	6	7	8	10	13
Fläkt1	4,31	4,2	4,75	5,97	6,15	7,68	7,18	7,71	8,17	7,89
Fläkt2	4,62	5,04	5,58	6,79	6,75	7,08	7,24	7,24	7,3	7,61
Fläkt3	4,31	4,77	5,6	6,35	6,87	7,51	7,45	7,38	7,77	7,95

**Bilaga 11.** Vattenhalt, torrsubstans och askhalt (försök 2)

Datum	2009-05-12	2009-05-19	2009-06-03	2009-05-12	2009-05-19	2009-06-03	2009-05-12	2009-05-19	2009-06-03
Dagar	0	7	22	0	7	22	0	7	22
Analys	Vattenhalt			Torrsubstans			Askhalt		
1 A I	0,47	0,45	-	0,53	0,55	-	0,46	0,34	-
1 A II	0,49	0,42	0,28	0,51	0,58	0,72	0,4	0,38	0,4
1 A III	0,51	0,63	0,67	0,49	0,37	0,33	0,31	0,35	0,49
1 B I	0,54	-	0,19	0,46	-	0,81	0,35	-	0,33
1 B II	0,44	0,5	0,5	0,56	0,5	0,5	0,54	0,39	0,38
1 B III	0,51	0,53	0,65	0,49	0,47	0,35	0,43	0,41	0,46
1 C I	0,56	0,4	0,12	0,44	0,6	0,88	0,31	0,47	0,32
1 C II	0,57	0,39	0,25	0,43	0,61	0,75	0,32	0,4	0,37
1 C III	-	0,47	0,27	-	0,53	0,73	-	0,41	0,29
2 A I	0,5	0,42	-	0,5	0,58	-	0,36	0,45	-
2 A II	0,51	0,39	0,24	0,49	0,61	0,76	0,34	0,42	0,42
2 A III	-	-	0,59	-	-	0,41	-	-	0,59
2 B I	0,51	0,53	0,27	0,49	0,47	0,73	0,42	0,34	0,4
2 B II	0,46	0,53	0,63	0,54	0,47	0,37	0,45	0,49	0,47
2 B III	0,62	0,59	0,68	0,38	0,41	0,32	0,26	0,49	0,47
2 C I	0,48	0,56	0,27	0,52	0,44	0,73	0,38	0,38	0,36

<b>2 C II</b>	0,47	0,47	0,63	0,53	0,53	0,37	0,47	0,53	0,41
<b>2 C III</b>	0,51	0,57	0,45	0,49	0,43	0,55	0,43	0,37	0,36
<b>3 A I</b>	-	0,49	-	-	0,51	-	-	0,38	-
<b>3 A II</b>	0,5	0,42	-	0,5	0,58	-	0,44	0,49	-
<b>3 A III</b>	0,5	0,65	0,72	0,5	0,35	0,28	0,44	0,42	0,46
<b>3 B I</b>	0,53	0,42	0,14	0,47	0,58	0,86	0,32	0,41	0,35
<b>3 B II</b>	0,5	-	0,31	0,5	-	0,69	0,38	-	0,35
<b>3 B III</b>	0,49	0,64	0,58	0,51	0,36	0,42	0,37	0,4	0,41
<b>3 C I</b>	0,51	0,37	0,13	0,49	0,63	0,87	0,37	0,43	0,41
<b>3 C II</b>	-	0,55	0,66	-	0,45	0,34	-	0,3	0,41
<b>3 C III</b>	0,49	-	0,32	0,51	-	0,68	0,33	-	0,49

**Bilaga 12. Koldioxid [ppm] (försök 2)**

	<b>Sträng 1</b>	<b>Sträng 2</b>	<b>Sträng 3</b>
<b>2009-05-13</b>	3301,404471	61927,67693	10992,90149
<b>2009-05-14</b>	2520,564083	47100,42345	8805,03836
<b>2009-05-15</b>	2582,427296	17736,99292	8513,583068
<b>2009-05-16</b>	2693,218193	9409,625422	7873,057971
<b>2009-05-17</b>	2491,993526	10704,55289	8594,622132
<b>2009-05-18</b>	3204,383823	7323,2807	7440,020228
<b>2009-05-19</b>	2425,045156	27635,47064	8425,462301
<b>2009-05-20</b>	2941,794423	13557,85452	7883,26181

**Bilaga 13. Material**

Instrumentskåp

pH-mätare; pH 330i, inoLab pH 720

Koldioxidmätare; Anagas CD98 plus

Temperaturgivare; Tinytag plus, Tinytag plus2, tempnet2s

Termoelement

Fjärrströmbrytare; gt2111

TellStick fjärrstyrning; USBD-101AA

PC-logger; Intab AAC-2, Intab 2100

U-rörsmanometer; TJ100 100mmH<sub>2</sub>O  
Prandtlrör 3mm  
Programvara; MatLab, Easyview, Teldus, Logtemp  
Hink, 10 1