

特定波長電磁波を用いての同軸流拡散火炎に 対する実験的研究

HOSOYA, Yutaka / 細矢, 豊

(発行年 / Year)

2007-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2007-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2007 年度

修士論文

特定波長電磁波を用いての 同軸流拡散火炎に対する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF CO-AXIAL DIFFUSION FLAME
IN ELECTRO-MAGNETIC FIELD AT X WAVE NUMBER

指導教授：川上 忠重

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

細矢 豊

Experimental study of co-axial diffusion flame in electro-magnetic field at X wave number

By
Yutaka HOSOYA

Key Words : Co-axial diffusion flame, Electro-magnetic wave, Methane absorption

Abstract

At present day, the combustion of fossil oil provides over about 70% of energy supply in industrial and domestic fields. On the other hand this fact gives birth to main source of air pollution and global warming. From this point, there is a necessity for developing the combustion technology which is earth-friendly for maintaining our high living standards. We have developed successful technique to achieve high energy saving and low emission of CO₂ by utilization of electro-magnetic energy at a given spectral emissivity in the range of infrared rays.

It is well known that the hydrocarbon fuel such as methane is able to absorb much radiant energy from infrared rays at 1200 cm⁻¹ of wave number. This phenomenon makes it possible to more accelerate the molecular motion like vibration and rotation of methane and to enhance the collision energy and collision frequency between methane and oxygen. Consequently, the flame temperature leads to increase due to the promotion of combustion reaction rate.

Experiments have been conducted to examine on how the combustion behavior of co-axial diffusion flame are influenced by the discharge of electro-magnetic energy at a given wave number. The substance, which can continuously discharge the electro-magnetic energy at 1200 cm^{-1} of wave number and more than at 0.9 of emissivity, is called it electro-magnetic sheet. The fuel used for the study is Town Gas (CH_4 ;88.0%, C_2H_6 ;5.8%, C_3H_8 ;4.5% and C_4H_{10} ;1.7% by volume) and DME fuel. We carry out comparative experiments with and without energy sheet to assess the efficiency of active-absorption. The energy saving rate is defined as water temperature rise in water container against air ratio in electro-magnetic field.

目次

第一章 緒論	
1 - 1 研究背景	1
1 - 2 研究目的	3
1 - 3 電磁波投与による燃焼促進について	3
第二章 空気比に対する電磁波投与の影響	
2 - 1 実験装置	4
2 - 2 使用燃料及び実験条件	5
2 - 3 空気比の定義	5
2 - 4 実験手順	6
2 - 5 実験結果及び考察	7
第三章 電磁波投与による排気ガスの影響	
3 - 1 実験装置	8
3 - 2 測定装置	8
3 - 3 使用燃料及び実験条件	10
3 - 4 実験手順	10
3 - 5 実験結果及び考察	11
第四章 結論	12

参考文献

謝辞

第一章 緒論

1 - 1 研究背景

我々は、ホモサピエンスが火を使うことを覚えたときから、他の動物とは異なる進化の過程、文明化の道をたどり始めた。有史以前より、火は照明、暖房、食品の加工、様々な生活用品や武器の製造などに使われ、実用と同時に精神・情緒・宗教・芸術面でも重要な役割を果たしてきた。火をデリケートに扱うことにより、美しい工芸品、鋭い刃物、素晴らしい料理などが生まれ、産業革命以降は動力の発生と工業製品の製造、輸送、戦争、宇宙開発に燃焼や爆発が利用されている。しかしながら、火は我々の生活を豊かにする一方で、地球環境を破滅に導く主要因となっていることも忘れてはならない。特に、ここ数年大きな注目を集めている海水面の上昇や陸地の砂漠化の原因とされる地球温暖化は、燃焼ガス中の炭酸ガスが起因とされている。

地球は太陽から、日々全人類が消費するエネルギーの1万倍以上もの膨大なエネルギーを可視光の形で受け取り、それと同じ量のエネルギーを遠赤外線と反射光の形で宇宙に放散して、バランスを保っている。もし仮に、エネルギーの放散が生じなければ、地球は灼熱の地獄とかしていたであろうし、逆に炭酸ガスをはじめとする温室効果ガスが大気中にまったくなければ、凍結した世界となっていたであろう。すなわち、現在の大气組成、地表の遠赤外線射出率ならびに上空の雲も含めた反射率の下で、太陽から受け取ったエネルギーの全量を宇宙空間に放散できる地表温度が、現在の環境温度となる。

しかし、もしここで、可視光は素通りさせるが、赤外線はある程度吸収する温室効果ガスの大気中濃度が増加するか、地表の赤外線射出率が低下すると、受け取ったエネルギーの全量が放散できるレベルまで地表温度が上昇せざるを得ない。

そもそも、温室というのはガラスで覆った栽培室のことで、可視光は通すが

赤外線は通さないというガラスの性質を利用して、受け取った太陽エネルギーを溜め込む仕組みである。それと類似の温室効果を発揮するガスには、炭酸ガス意外に、フロン、メタン、亜酸化窒素などがあり、炭酸ガスの1万倍もの威力を発揮するフロンを筆頭に、炭酸ガスよりはるかに大きな温室効果を発揮するものがいくつかある。しかし、炭酸ガスは大気中濃度が高いために、温暖化への寄与率が全体の55%となるため、大気中の炭酸ガス濃度が急激に増えると、地球温暖化が生じることになる。

炭酸ガス自体、火山活動、有機物の腐敗と発酵、生物の呼吸作用、森林火災などによっても、かなりの量が生成される。ここで、物質的に独立している地球を、大気圏、海洋圏、地殻圏、生物圏の四つに分け、これらの圏を循環する炭素循環サイクルを考えてみる。

炭素は、陸上植物によって、毎年1100億トンの炭素を炭酸ガスの形で大気圏から取り込み、太陽エネルギーを使って光合成により炭水化物に変わる。一方で、呼吸作用によって500億トン、さらに落ち葉や老化植物の腐敗・発酵によって、600億トンの炭素を炭酸ガスの形で大気圏に返す。よって、全体としては零で、バランスが取れている。

しかし、生物圏に属するはずの人類がこの循環サイクルを乱しはじめている。産業革命以降、化石燃料に目をつけた人類が、地殻圏の炭素を大気圏に大量移動させるようになったのだ。すなわち、人類は生物圏と地殻圏において平衡していた炭素を、急速に大気圏に送りはじめたのである。その量60億トン、炭酸ガスに換算すると220億トンにも昇り、いまなお増えつづけている。炭素循環サイクルにおいて、この流れは明らかに異質であり、炭素が再び地殻圏に到達するには天文学的な歳月が必要となる。

そこで、地球温暖化を防止する、その最も確実な対策は、化石燃料の使用を即刻中止することである。とはいえ、現存する産業社会と市場経済との共存は不可能であり、様々な問題を含んでいる。核融合のような、無限のエネルギーを安価、かつ安全に手に入れることが出来れば、この問題を解決することが出来るかもしれないが、実用化の予想すらも困難である現状において、その時間稼ぎすら重要なものとなってくる。

1 - 2 研究目的

本研究は、メタン分子の吸収帯に対して特定波長の電磁波を投与し火炎温度の上昇を導くことにより、燃焼機器に対する更なる高性能化、すなわち省エネルギー化を目的とする。しかしながら、電磁波投与による燃焼促進に関する報告例はほとんどなされていない。そこで、本実験は電磁波投与による燃焼促進の基礎実験として、空気比に対する水温上昇の変化及び、排気ガス成分の測定を行うことにより、電磁波投与時の燃焼特性の解明を行う。

1 - 3 電磁波投与による燃焼促進について

古くからスワンバンドなどの吸収帯が、天文学などの学問において利用され、大いにその学問の発展に貢献してきた。また、燃焼の分野においても、火炎中の化学反応のメカニズム解明のために、光学的観測による各種分子の吸収帯や発光スペクトルが利用されてきた。

しかしながら、このように広く知られていた吸収帯(Fig.1)に対し、同じ波長の電磁波を投与することによって、その分子の持つエネルギーレベルを上げるようなことはなされてこなかった。そこで本研究においては、メタン分子の持つ吸収帯に対して、同じ波長域の電磁波を与えることによってそのエネルギーレベルを増大させ、同時にメタン分子から派生する活性化学種の振動及び回転運動をも増大させる。それにより、酸素原子との衝突頻度の増加による燃焼反応の促進が生じ、最終的に火炎温度の上昇につながる。

第二章 空気比に対する電磁波投与の影響

2 - 1 実験装置

Fig.2 に本実験で用いた実験装置の概略図を示す。それらは主に、噴流円形バーナ(内径 8mm、外形 12mm)、バーナ本体、円筒容器、空气管状チューブ、ワイヤーネット、整流板、電圧コントローラー、送風機、ダンパー、燃料用流量計、空気用流量計などによって構成されている。バーナ本体は、外直径 150mm、高さ 300mm の円筒形であり、水用円筒容器は内直径 130mm 及び高さ 300mm で、ジュラルミン製のものをを用いた。

また、Fig.3 に実験装置の詳細図を示す。火炎は、噴流円形バーナに燃料を、それを覆う空气管状チューブに空気を流すことによって同軸流拡散火炎として形成される。送風機からの空気は流量計により流量が調節され、ワイヤーネット、整流板を介すことにより整流される。バーナ上部には水用円筒容器が設置され、その中央部には水温測定用の熱電対が固定されている。このとき、空气管状チューブと水用円筒容器の間にある程度の間隙が存在し、ここからの二次空気によって火炎が安定する。また、エネルギーシートはバーナ出口近傍に設置されていて、取り外し可能となっている。

2 - 2 使用燃料及び実験条件

本実験で用いた燃料は DME、純度 99.9% のものを、都市ガス 13A である。空気は大気中のものを送風機を用いて利用する。燃料流量は DME、1.6NL/min、都市ガス、4.0NL/min である。DME の空気流量の範囲は、32~46NL / min(エネルギーシート無し)、32~50NL / min(エネルギーシートあり)であり、2NL ごとと実験を行った。また、都市ガスの空気流量の範囲は 40~65NL / min であり、5NL ごとに測定が行われた。温度測定のための水は 1.6L であり、室温、大気圧下において実験が行われた。

2 - 3 空気比の定義

本研究を行うにあたり空気比を以下のように定義する

$$= \frac{A}{A_0} \quad (2.1)$$

ここで A_0 はそれぞれの燃料の理論空気量であり、 A は送風機より送られる実際の空気量である。

2 - 4 実験手順

以下に本実験の手順を示す。

- 1 . 送風機の電源を入れ、30 分ほどの暖気運転を行う。
- 2 . バーナ上部に位置する円筒容器に、正確に測定された 1.6L の水を注水し、ふたを閉め熱電対の電源を入れる。
- 3 . わずかな量の燃料を流し種火を作り、安定性を視認したのち、上部より鉄製の空气管状チューブをかぶせる。流量計を用いて所定の燃料流量、並びに空気流量に設定する。ただし、DME 燃料時、空気流量計は 50NL のもののみを、都市ガス時はこれに 40NL のものを用い合計値とする。また、それと同時にストップウォッチを起動する。
- 4 . 30 秒毎に水温測定を行い、ノートに記載する。
- 5 . 水温が 80 付近で実験を終了し、水を抜き、一時間ほど実験装置を冷やす。
- 6 . 手順 2 に戻り、以下繰り返す。

これらから得られた数値より、エネルギーシート装着時及び未装着時の水温変化の様子をエクセルを用いて解析を行った。

2 - 5 実験結果及び考察

Figs4~11 に DME 燃料による空気比 $\beta = 1.40\sim 2.01$ のエネルギーシート装着時及び未装着時の燃焼時間に対する水温変化の様子を、Figs13~18 に都市ガスによる空気比 $\beta = 1.05\sim 1.71$ の範囲におけるエネルギーシートの装着時及び未装着時の燃焼時間に対する水温変化の様子を示す。また、Fig.12 には DME 燃料における、空気比に対する一分間あたりの水の温度上昇割合を、Fig.19 には都市ガスを用いた場合のものを示す。

DME、都市ガス共に、エネルギーシート装着時の方が、すべての空気比において高い値を示す。これらから、電磁波エネルギーシートの装着による電磁波エネルギーの投与は燃焼反応に影響を与え、火炎温度の上昇を促すことは明らかである。メタン分子にはある特定波長域に大きな吸収帯が存在し、そこに電磁波エネルギーを投与すると、分子の振動・回転運動を促進させる。この作用はメタン分子から発せられる燃焼先駆体（活性化学種）にも大きな影響を与え、それらの振動・回転運動をより加速することになる。これは空気中の酸素分子との衝突頻度を高め、かつ衝突エネルギーを高める。その結果、燃焼反応の促進による火炎温度の上昇が導かれる。

また、ここで水の温度上昇によって電磁波エネルギーシートの効果を検討するために、省エネルギー率 γ を以下のように定義する。

$$\gamma = (\beta_2 - \beta_1)/(\beta_1) \times 100 \quad \% \quad (2.2)$$

本実験において、その省エネルギー効果は DME で最大 3.5%、都市ガスにおいては最大 4% であり、大型ボイラでも、同程度の効果が確認されている。

しかしながら、空気比の減少とともに省エネルギー効果も減少傾向にあった。これは、未燃空気の酸素濃度の低下により、酸素原子との衝突頻度の低下が考えられる。

第三章 電磁波投与による排気ガスの影響

3 - 1 実験装置

Fig.20 排気ガス測定時の実験装置の概略図を示す。実験装置は第二章の水温測定用のものに改良を施したものである。水用の円筒容器をはずし、上部に排気ダクトを設ける。これは燃焼排気ガス中の水滴が火炎に影響を与えないようにかえしがついている(Fig.21)。また第二章の時とは異なり、燃焼中に火炎に二次空気の流入がまったくない構造となっている。高温排気ガス中では NO_x などの化学反応が生じてしまうため、それを防止するために水冷装置を設置した。これは排気上部に内直径 2mm の銅パイプを巻き、水を流すといったものである。水冷装置により冷やされた燃焼ガスは脱水装置によって水分が除去された後、各種ガス濃度計により O_2 、 CO_2 、 NO_x 濃度が測定される。

3 - 2 測定装置

本実験で使用した排気ガス分析器を Fig.22 に示す。ガス分析においては島津製作所製赤外線式ガス濃度測定装置(CGT-7000)及び燃焼排ガス NO_x - O_2 測定装置(NO A-7000)を使用し、 O_2 、 CO_2 、 NO_x を同時に連続して測定した。

各採取ガスの分析方法は次の通りである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

1. O_2 : 限界電流式ジルコニア法

ジルコニアに CaO や Y_2O_3 を加えた安定化ジルコニアは強度にすぐれ、高温中に置くと、ジルコニア両端の酸素濃度の違いにより、測定ガス中の酸素濃度を測ることができる。

2. CO₂：単光源二光束非分散型赤外線吸収法（比率測光方式）

CO、CO₂、CH₄、などの異原子分子からなるガス分子に赤外線を照射するとその固有の振動および回転の運動エネルギー準位の遷移が起り、特定の波長の赤外線を吸収する特性を利用したものである。

このガス分子の赤外線の吸収は、ランベルトベールの吸収法則に従っている。

$$I_2 = I_1 e^{-(\lambda) \cdot C \cdot l}$$

I_2 ：透過光の強さ I_1 ：入射光の強さ

(λ) ：波長、ガスの種類などによる係数

C ：ガス濃度 l ：測定セルの長さ

この式に従って、透過光の強さを測定することにより、ガス濃度が測定できる。

3. NO_x：常圧式化学発光法

一般にNOを含んだ試料ガスとO₃を容器内に混合すると、NOはNO₂となりその一部は、励起状態にある。この励起状態のNO₂分子が基底状態にもどる時に励起エネルギーを光として放出する。この放出される光は、化学発光と呼ばれ、反応前のNO分子の量に比例する。発光の量を測定することにより、試料中のNOの濃度を測定できる。NO₂は、コンバーターにおいてNOに還元し、先と同じ方法で測定する。そして、NOとNO₂の和をNO_xとする。

3 - 3 使用燃料及び実験条件

先ほどと同様、実験で用いた燃料は DME、純度 99.9% であり、都市ガス 13A である。空気流量の測定範囲は、DME、32~50NL/min、都市ガス、40~65NL/min であり、空気比はそれぞれ、DME $\phi = 1.40 \sim 2.18$ 、都市ガス $\phi = 1.05 \sim 1.71$ である。雰囲気温度及び雰囲気圧力は室温、通常大気圧下において実験が行われた。

3 - 4 実験手順

以下に排気ガス測定における実験手順を示す。

- 1 . 送風機及び排気ガス分析器の電源を入れ、30 分ほど暖機運転を行う。
- 2 . 排気ガス分析器の測定成分ガスの、ゼロ及びスパン校正を行う。
- 3 . 水冷装置に水を流し、先ほどと同様種火を作り、上から鉄製空気管状チューブをかぶせる。
- 4 . 各種流量計により、燃料及び空気流量を所定の値に設定した後、測定精度向上のため、5 分ほど時間をおいてから測定を行う。
- 5 . このとき、赤外線ガス分析器によって測定された燃焼排気ガス成分は分析器対応のプリンターへと出力される。

エネルギーシート装着及び未装着状態においてそれぞれ実験が行われ、これらによって得られた排気ガス成分より燃焼解析が行われた。

3 5 実験結果及び考察

Figs.23,24 に DME と都市ガスの空気比に対するエネルギーシート装着時及び未装着時における排気ガス成分中の O_2 濃度変化の様子を示す。空気比の減少とともに O_2 濃度は低下し、エネルギーシート装着時のほうが同じ空気比において、より O_2 濃度は低い値を示す。これは電磁波投与に伴う燃焼促進によるものと考えられる。しかし、第二章の実験と同様、空気比の低下に伴いエネルギーシートによる燃焼促進効果は大きく減少した。

同様に Figs.25,26 に DME 及び都市ガスの空気比に対する排気ガス中の CO_2 濃度の変化の様子を示す。空気比の減少とともに CO_2 濃度は増大する、特に電磁波投与による燃焼促進によって、エネルギーシート装着時のほうが未装着時より CO_2 濃度は大きくなる。しかしながら、やはり空気比の低下に伴いその効果は減少する。

Figs.27,28 に DME 及び都市ガスの排気ガス成分中の O_2 濃度に対する CO_2 濃度の変化の様子を示す。 O_2 濃度の低下に伴い CO_2 濃度は増加し、ほとんどの範囲において、エネルギーシート装着時、未装着時に比べてより O_2 濃度の低下及び CO_2 濃度の増加が見られる。

DME 及び都市ガスの空気比に対する NO_x 濃度の変化の様子を Figs.29,30 に示す。DME において、 NO_x 濃度は空気比 1.66 で最大値をとり、それ以降は空気比の減少とともに低下する傾向にある。電磁波投与による NO_x 濃度の増減はあまり見られない。これは、電磁波投与による火炎の温度上昇はサーマル NO_x 、すなわち温度に依存する NO_x 排気の影響はさほど強く受けないものと考えられる。しかし、都市ガスにおいては、電磁波投与によって NO_x 濃度に影響を与え、全体としては高いものの、空気比 1.15 付近で逆転する傾向を示した。

第四章 結論

本実験で得られた結論は以下の通りである。

- 1) メタン燃料等に、ある波長域、ある強度の電磁波エネルギーを、燃焼開始領域に投与すると、燃焼反応促進による火炎温度の上昇が確認された。
- 2) その燃焼反応促進による省エネルギー効果は DME においては 3.5%であり、都市ガスにおいては 4%であった。
- 3) DME 燃料において、空気比の低下に伴い電磁波投与による燃焼促進効果は減少する。

参考文献

- 1) 岡島敏,高橋清太郎,岡子修,小山勝,伊東正浩:遠赤外線を利用した省エネ・高効率バーナの開発,第14回日本エネルギー学会,pp.276-277(2005-8)
- 2) 岡島敏,高橋清太郎,岡子修,小山勝,伊東正浩:ある特定波長の電磁放射エネルギーによる燃焼改善効果の実験的研究 第43回燃焼シンポジウム,講演論文集,pp512-513(2005-12)
- 3) 岡島敏,高橋清太郎,岡子修,小山勝,伊東正浩:電磁波放射エネルギーを利用したのボイラー燃焼効率改善への挑戦,化学工業,Vol.56, No12,pp908-912(2005-12)
- 4) Alfred. Gordon. Gaydon, Hans. G. Wolfhard: Flames, pp123-147, (1979)

謝辞

本研究を行うにあたり、終始ご指導・ご鞭撻して頂いた岡島敏教授ならびに川上忠重教授に深く感謝し、御礼を申し上げます。また、実験を進めるにあたり、多くのご協力を賜りました中央工作室の島貫氏に深く感謝し御礼申し上げます。そして、ご助言を頂きました熱工学研究室の諸先輩方、院生の皆様に深く感謝の意を表します。

平成 19 年 2 月

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

細矢 豊

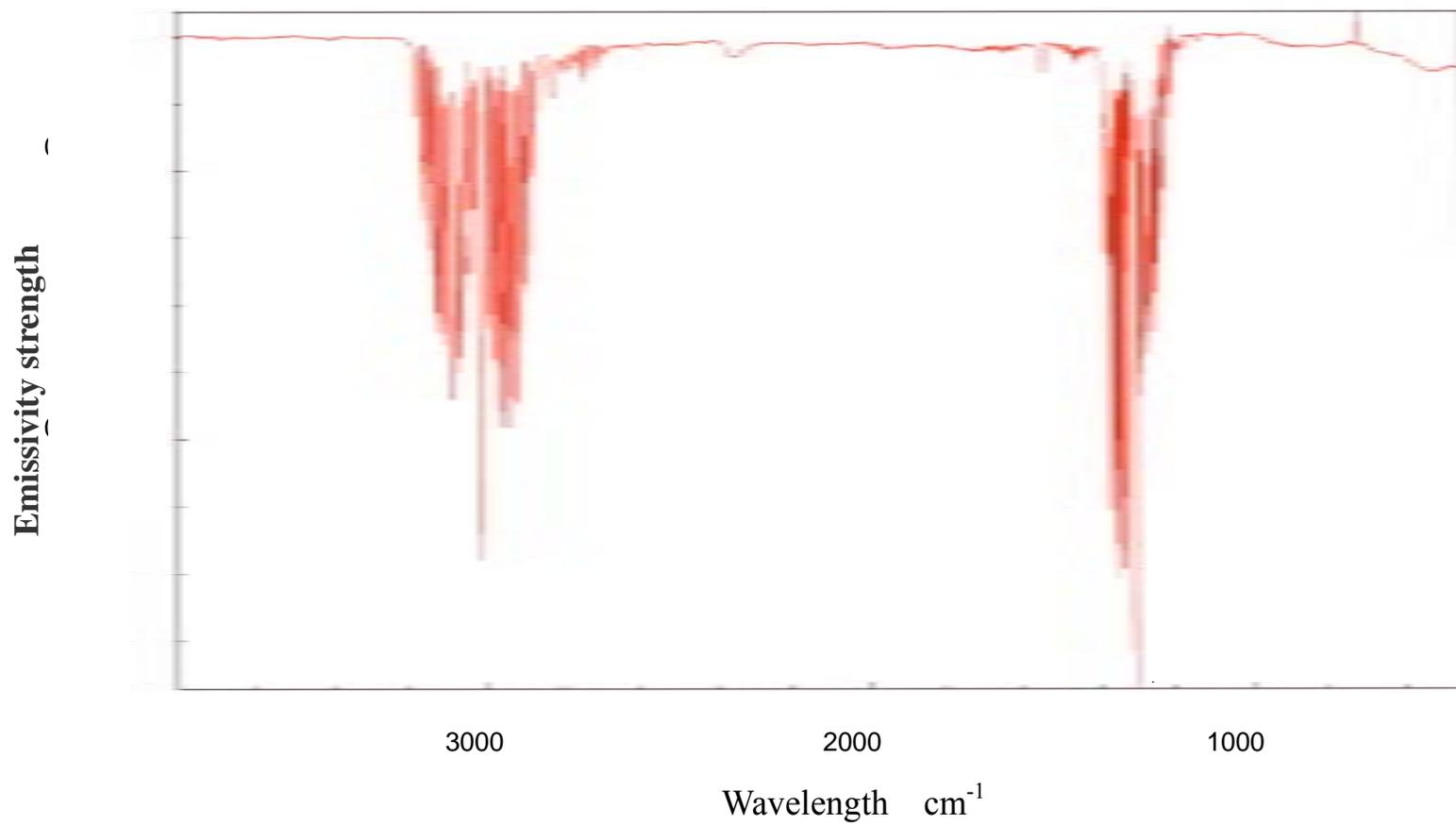


Fig.1 Methane absorption

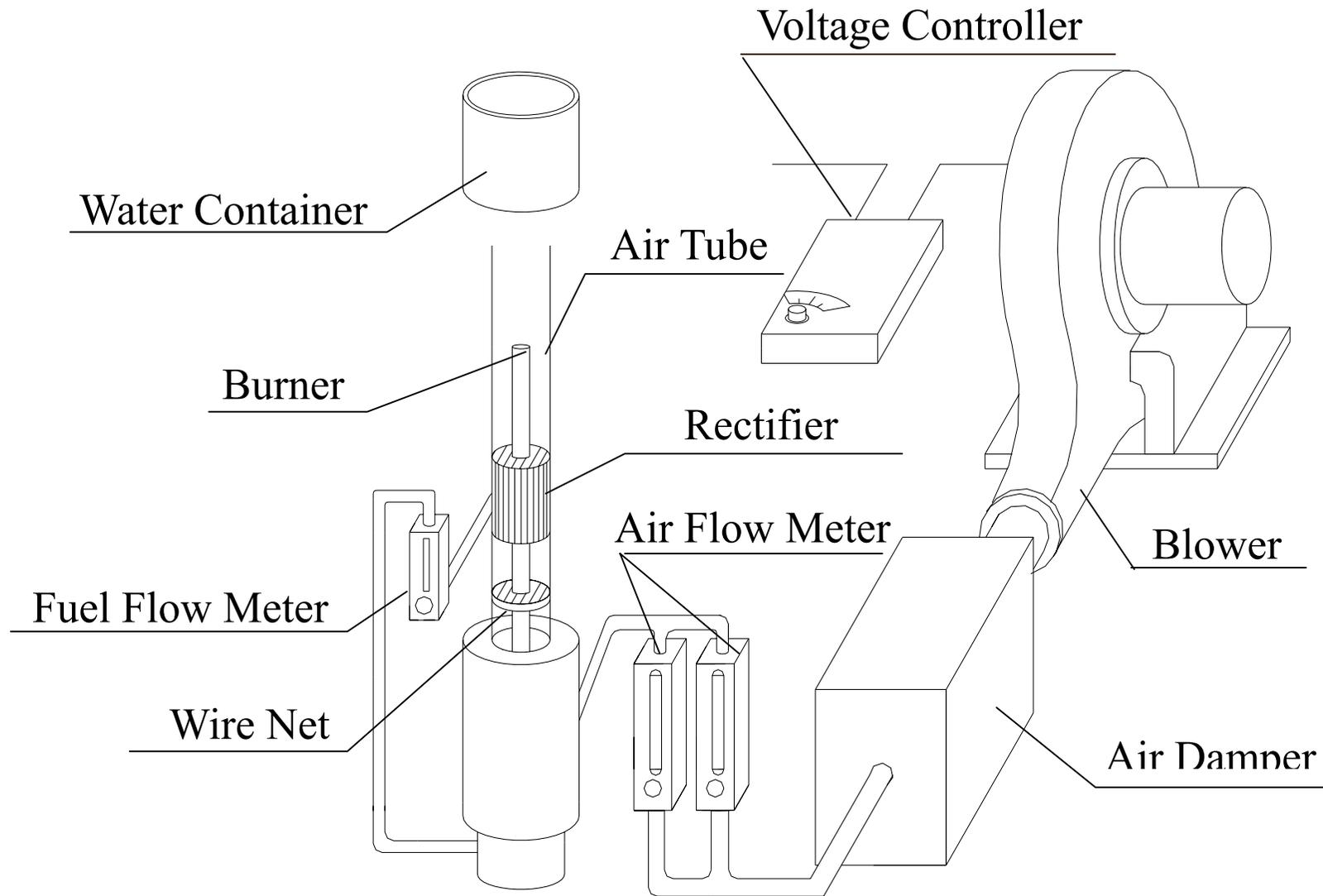


Fig.2 Experimental setup

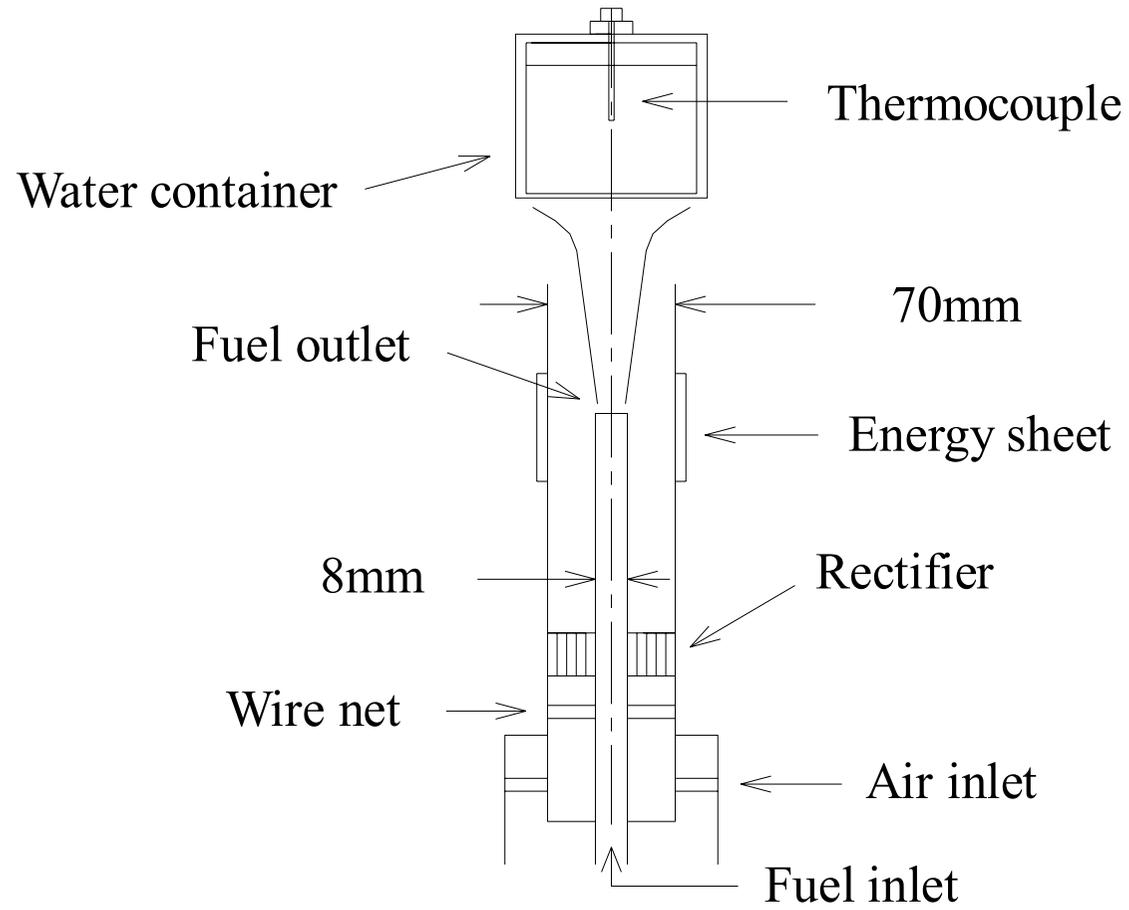


Fig.3 Detail of burner system.

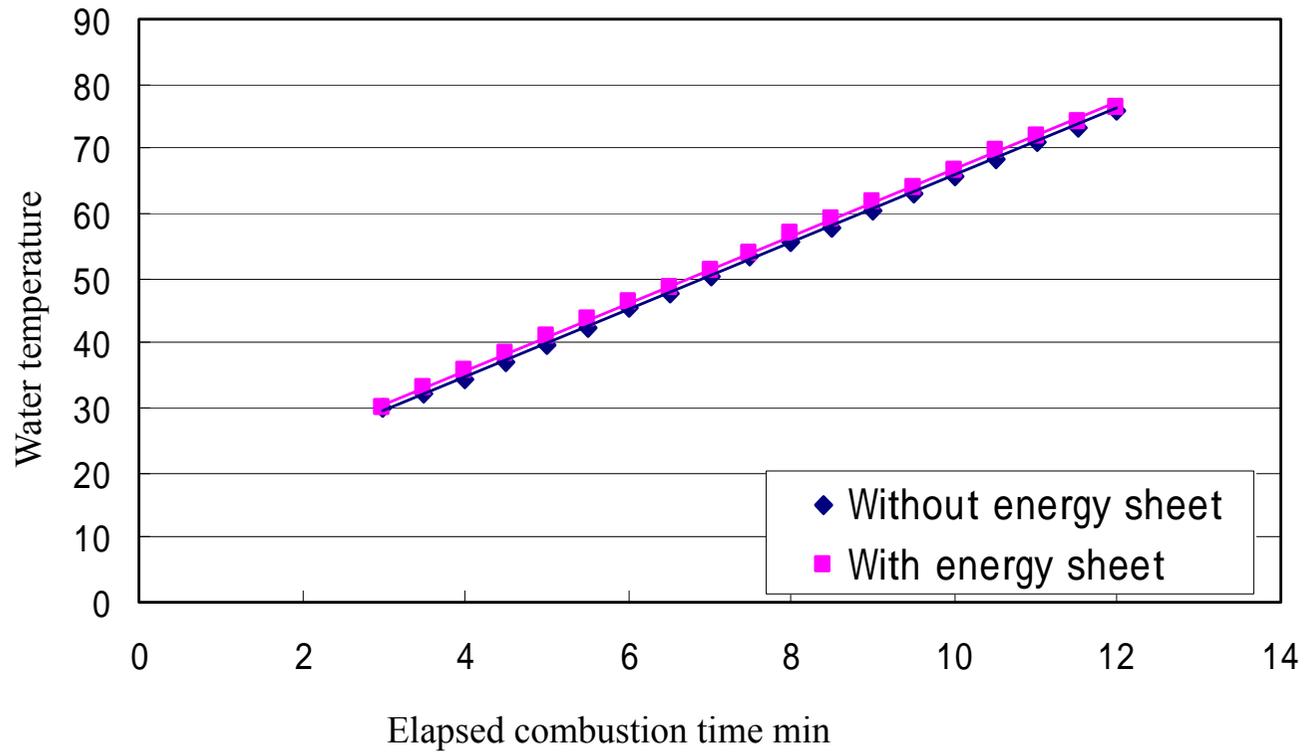


Fig.4 Water temperature rise of DME
at 1.40 air ratio

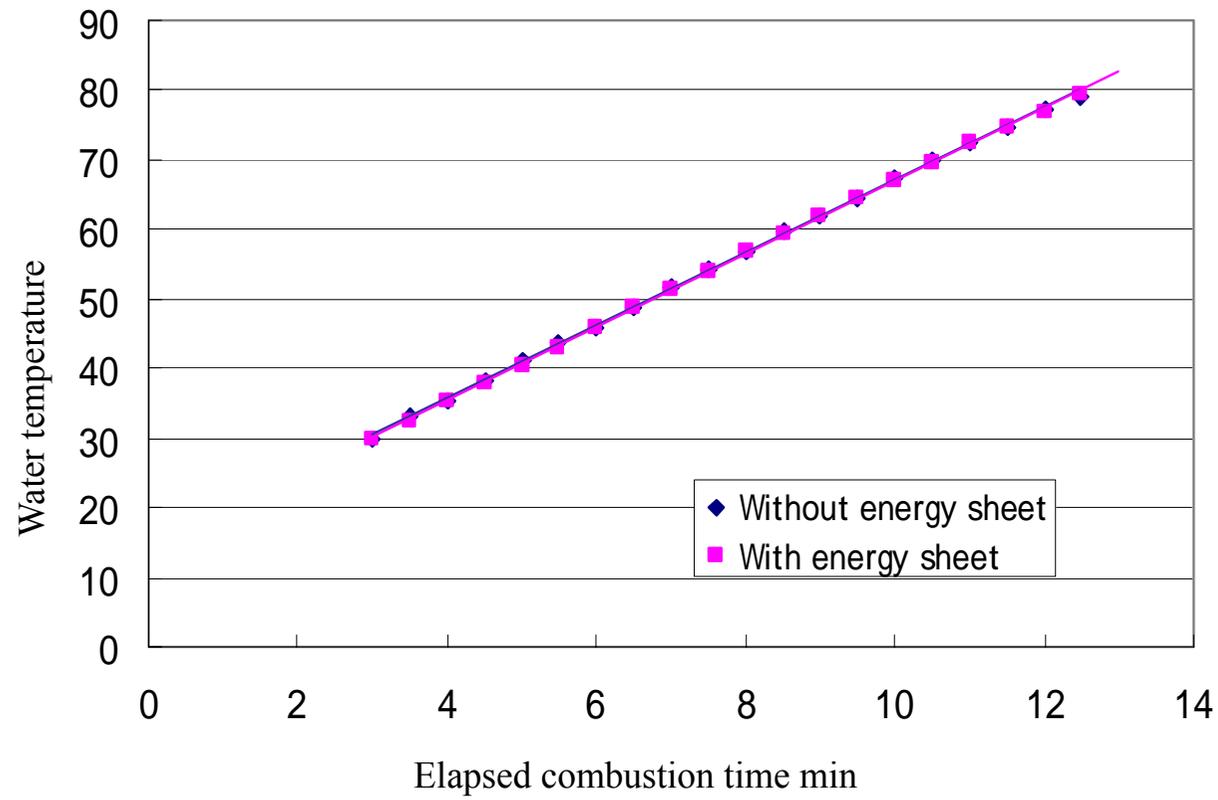


Fig.5 Water temperature rise of DME
at 1.49 air ratio

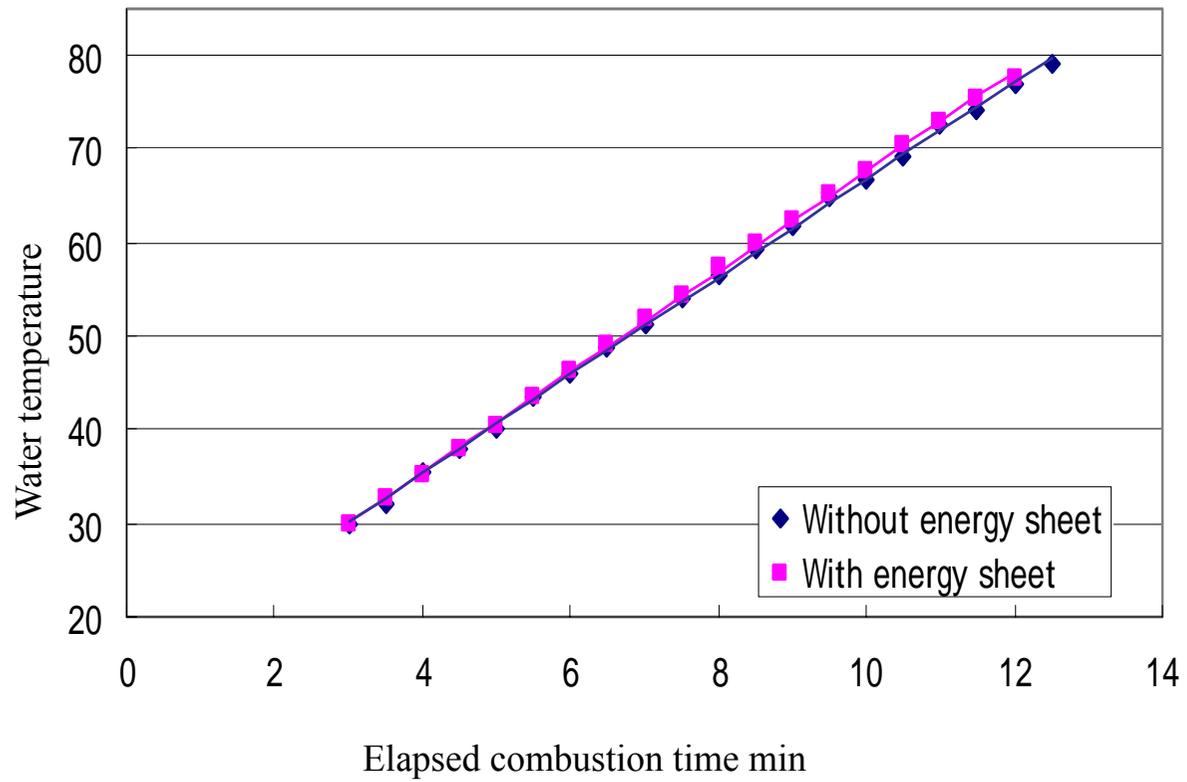


Fig.6 Water temperature rise of DME
at 1.58 air ratio

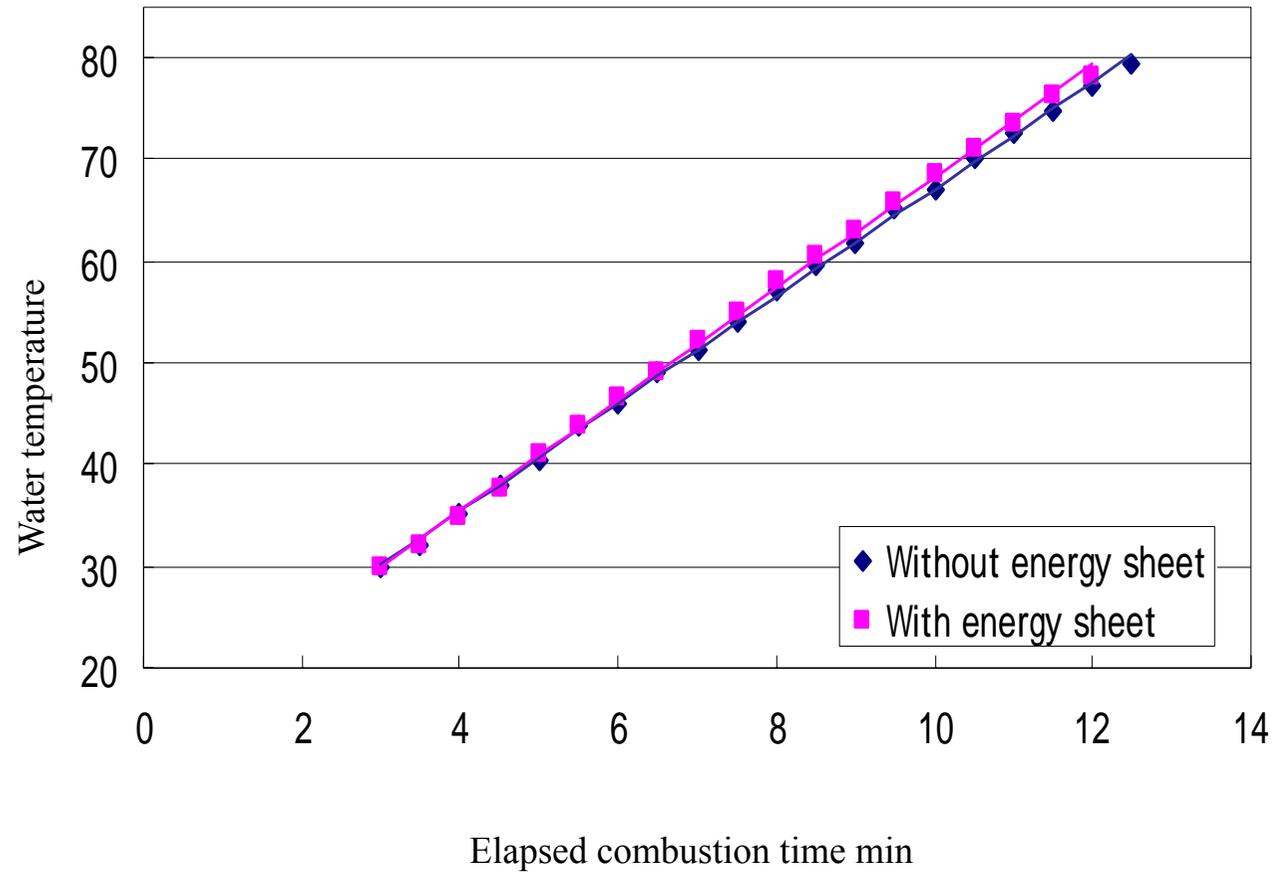


Fig.7 Water temperature rise of DME
at 1.66 air ratio

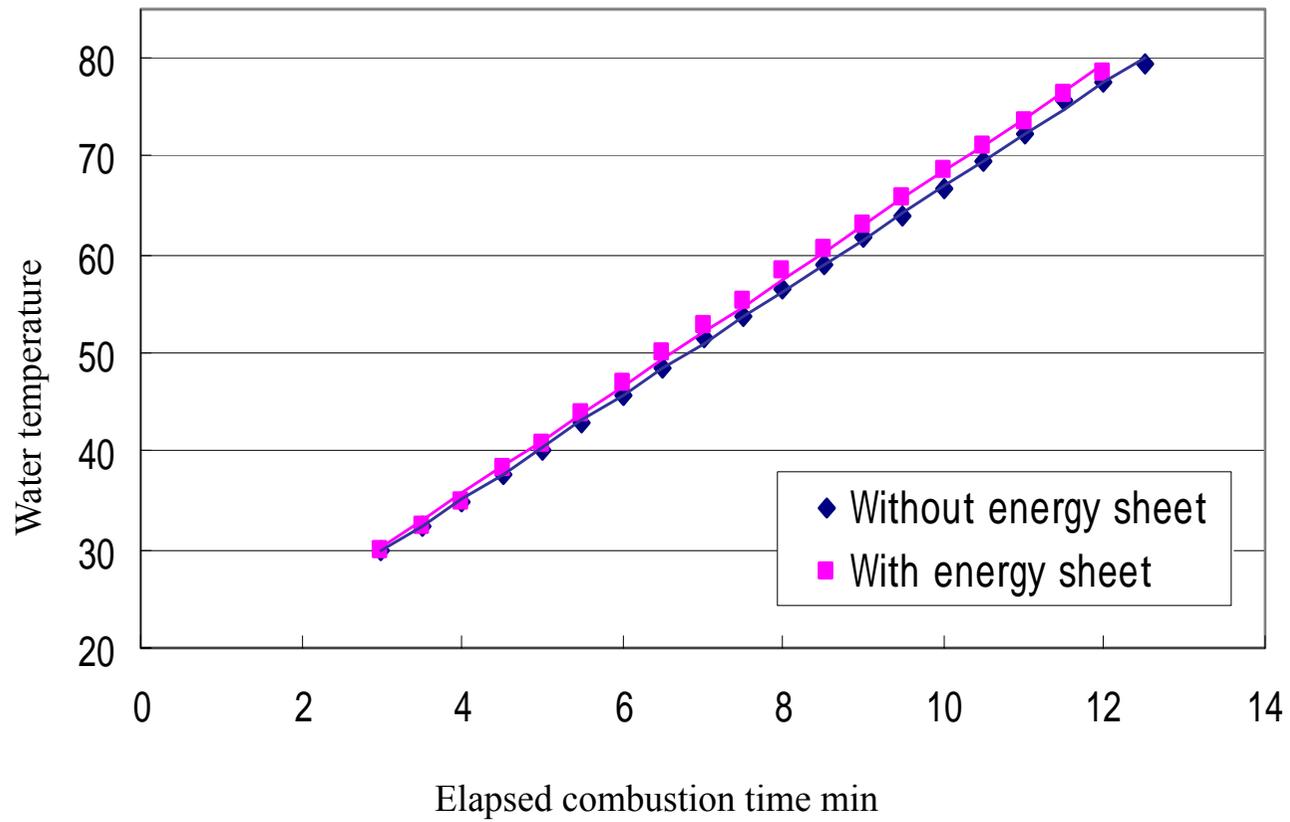


Fig.8 Water temperature rise of DME
at 1.75 air ratio

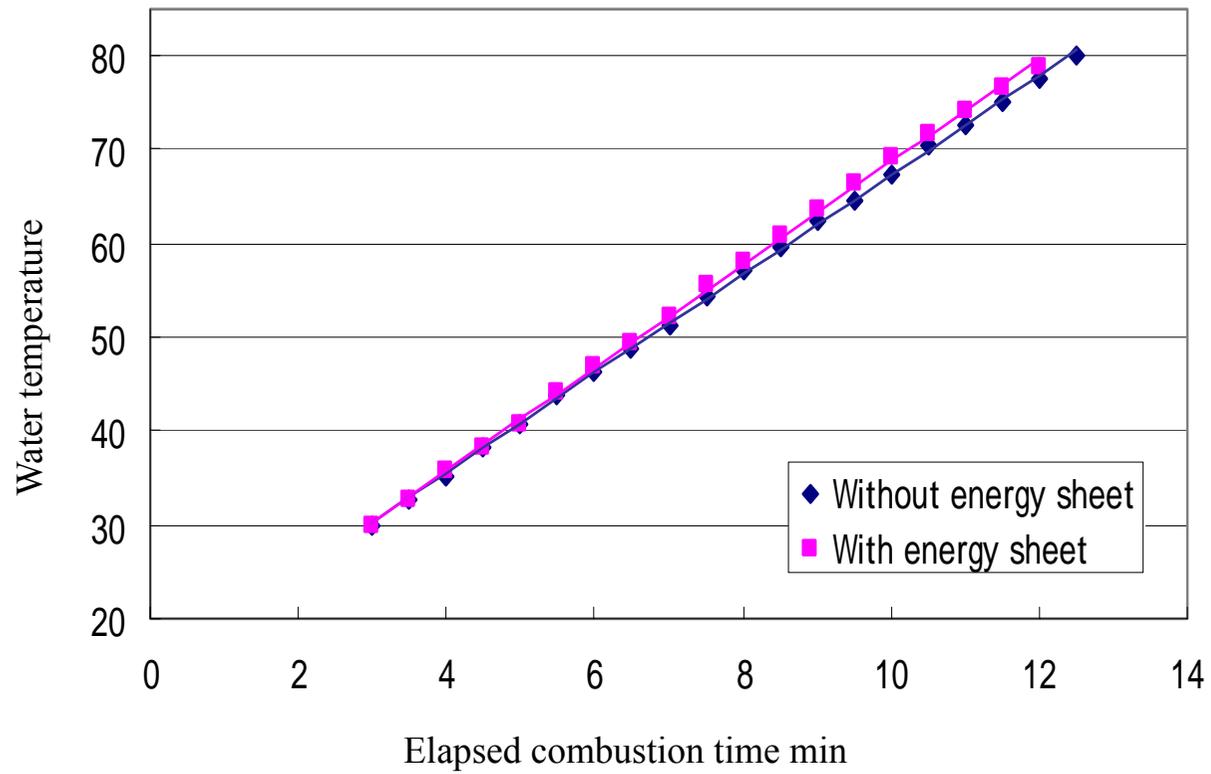


Fig.9 Water temperature rise of DME
at 1.84 air ratio

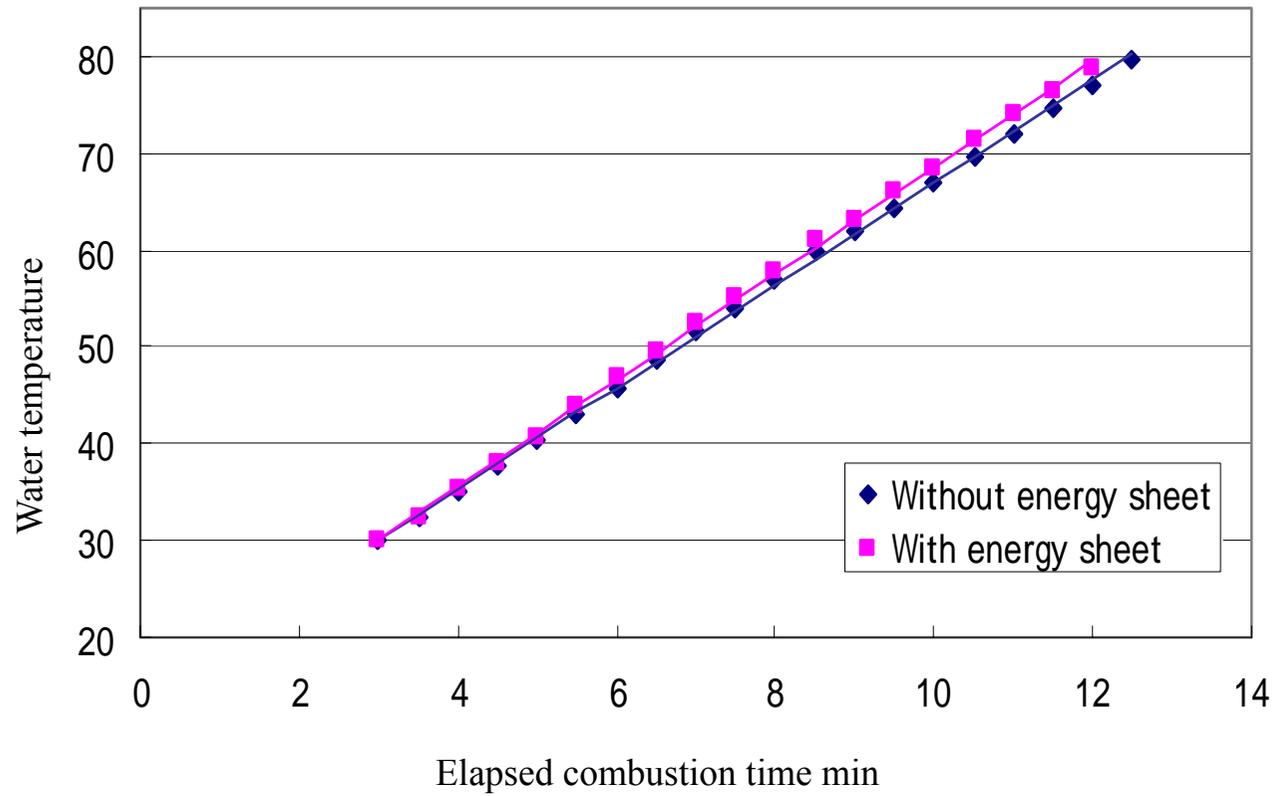


Fig.10 Water temperature rise of DME
at 1.93 air ratio

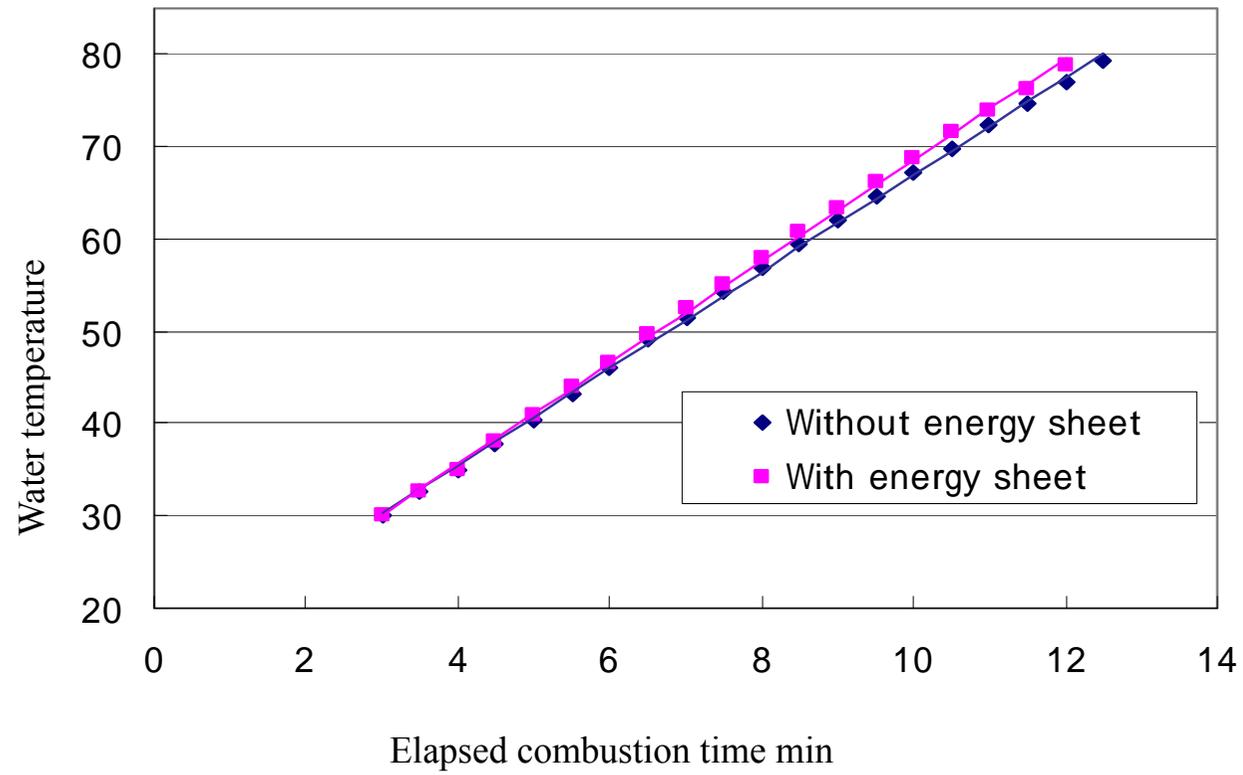


Fig.11 Water temperature rise of DME at 2.01 air ratio

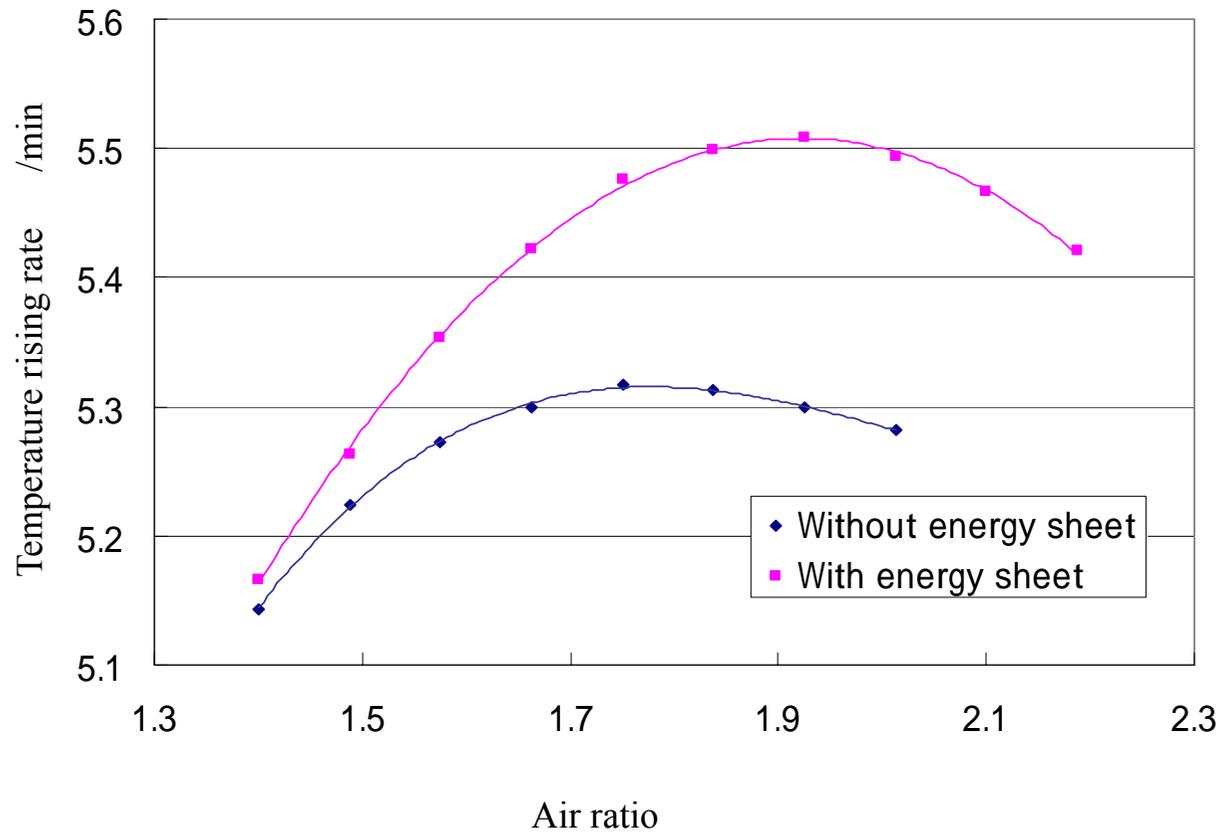


Fig.12 Temperature rising rate with and without electro-magnetic energy sheet against air ratio by DME

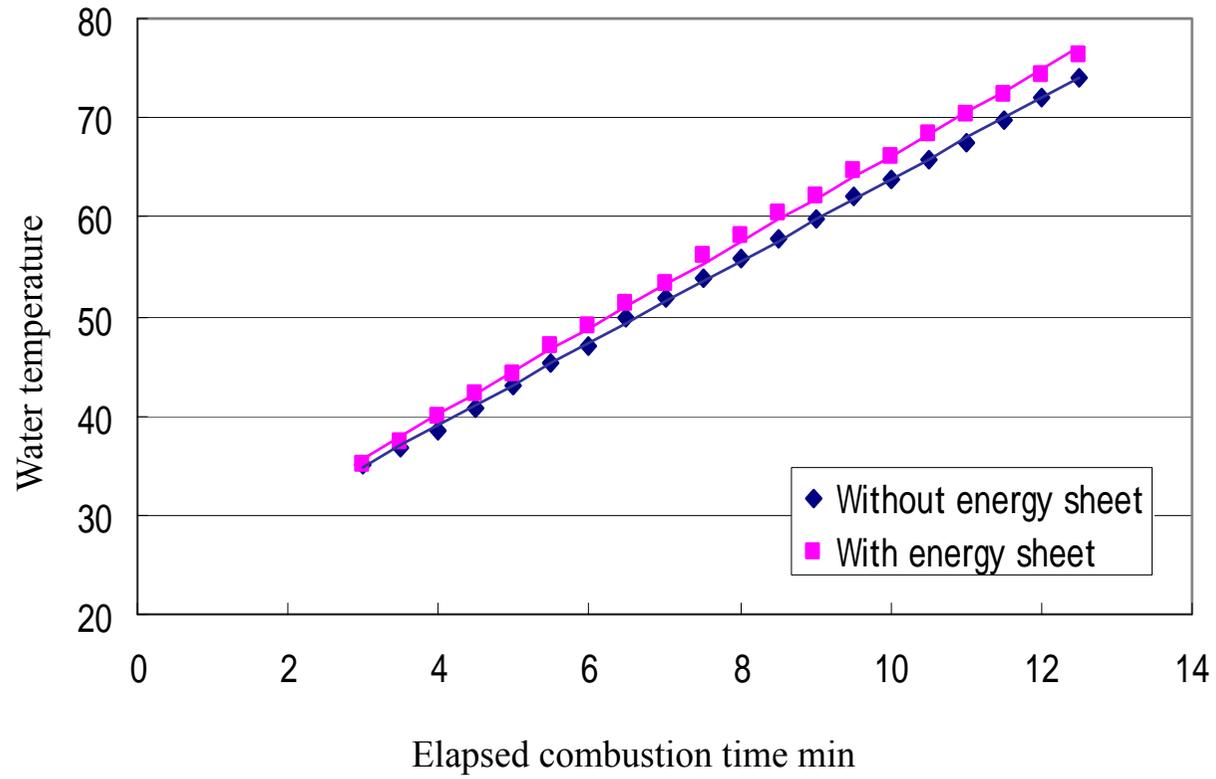


Fig.13 Water temperature rise of Town Gas at 1.05 air ratio

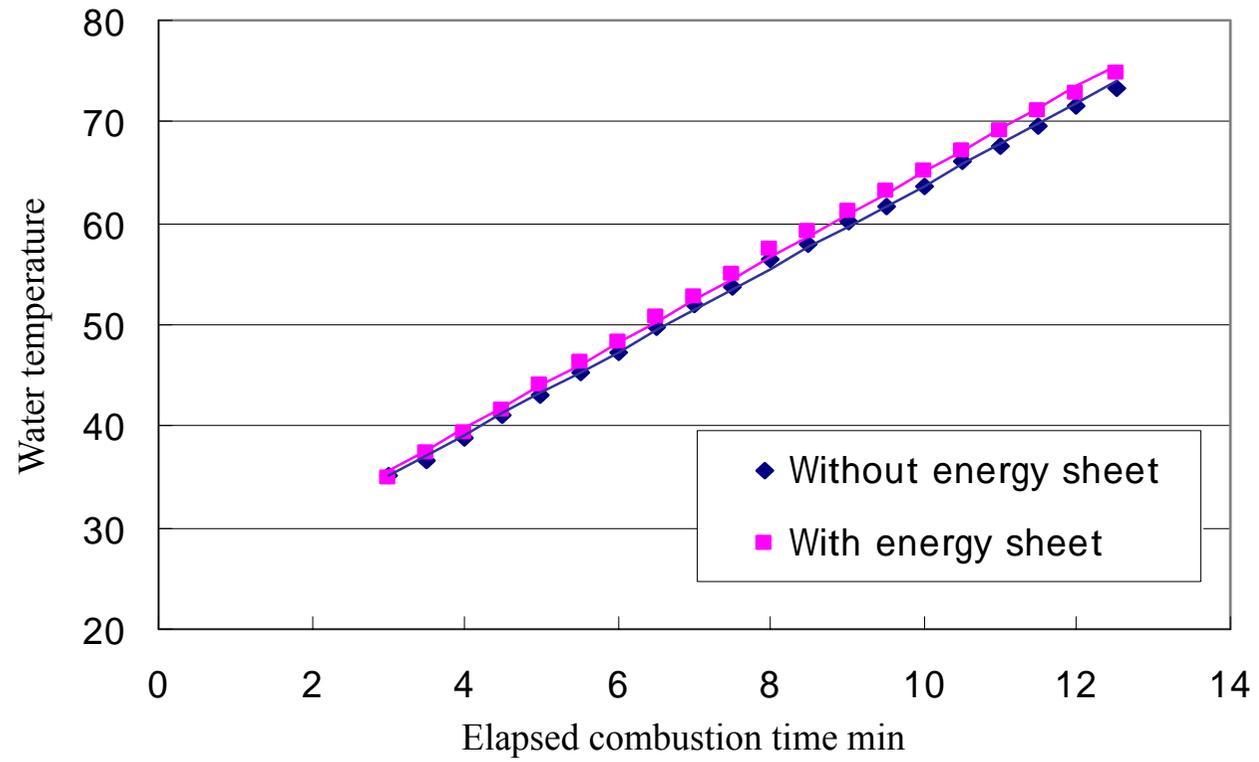


Fig.14 Water temperature rise of Town Gas
at 1.18 air ratio

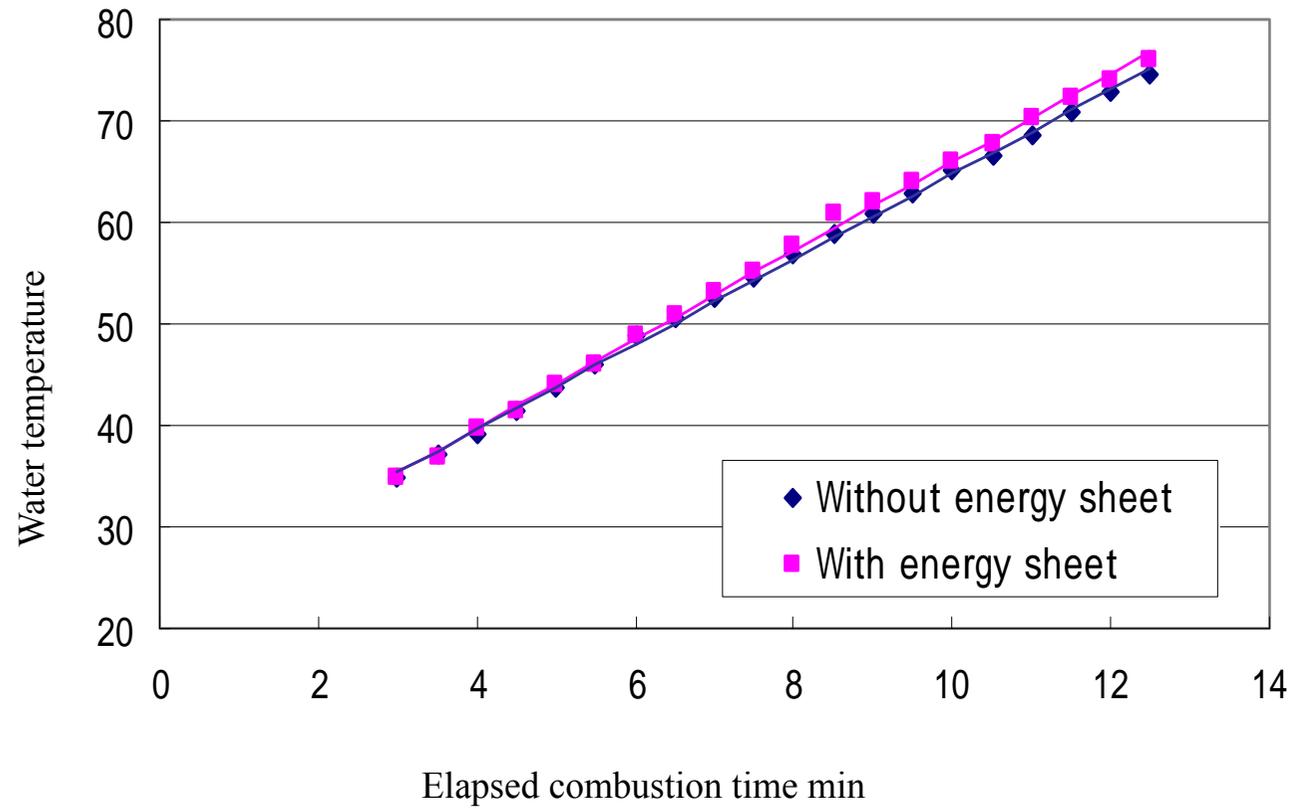


Fig.15 Water temperature rise of Town Gas at 1.31 air ratio

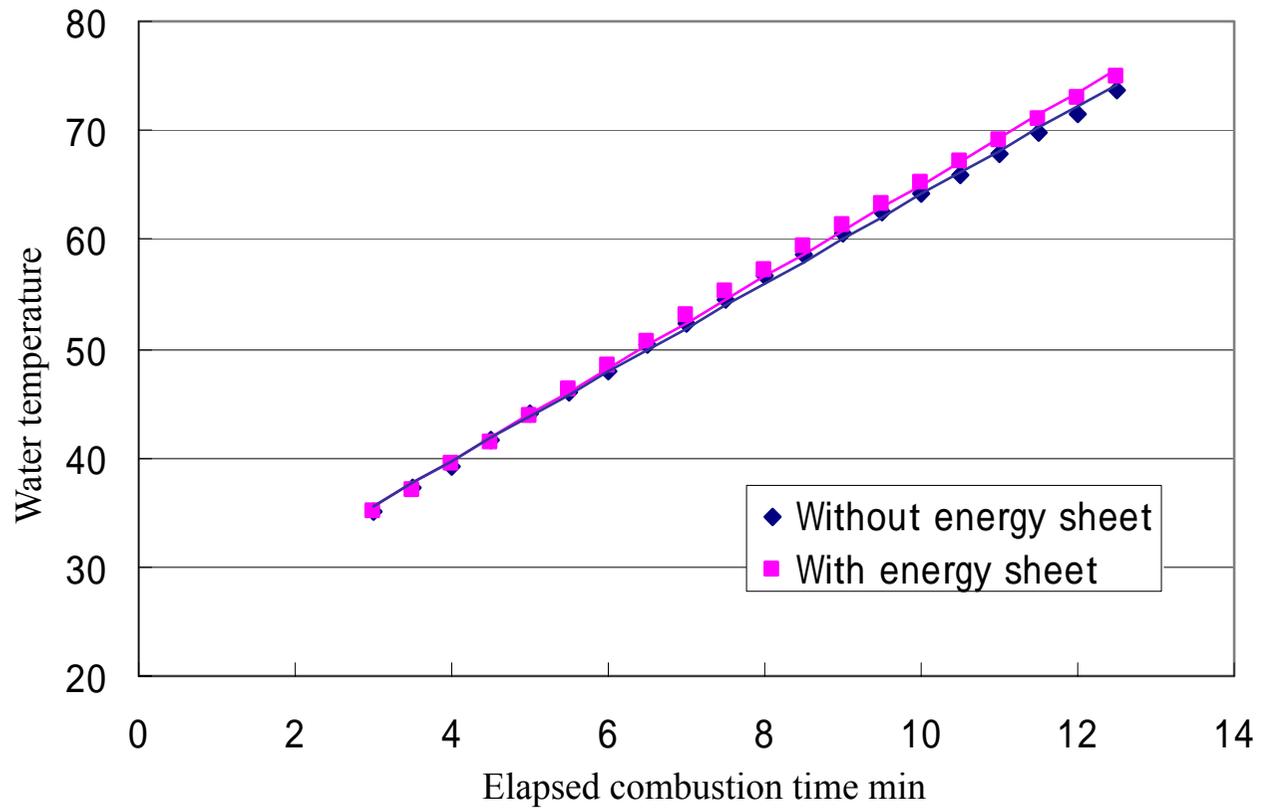


Fig.16 Water temperature rise of Town Gas
at 1.44 air ratio

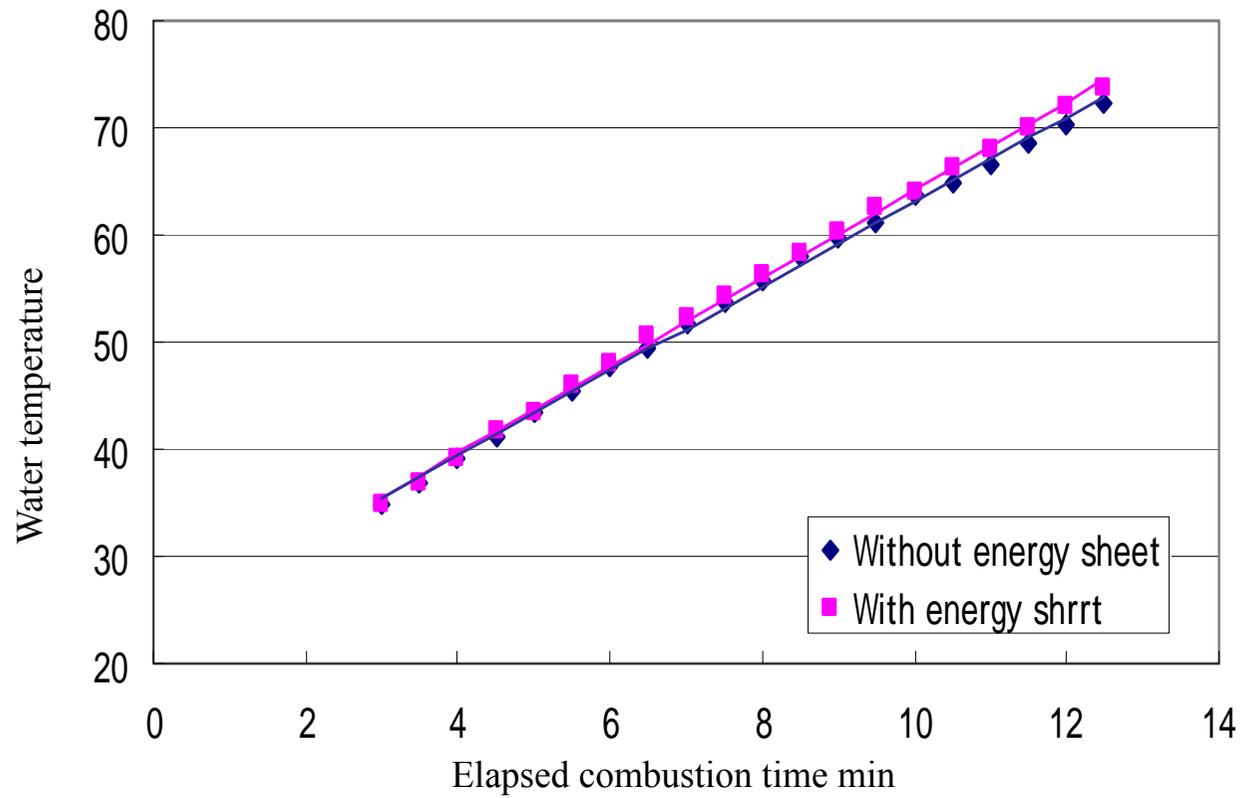


Fig.17 Water temperature rise of Town Gas at 1.57 air ratio

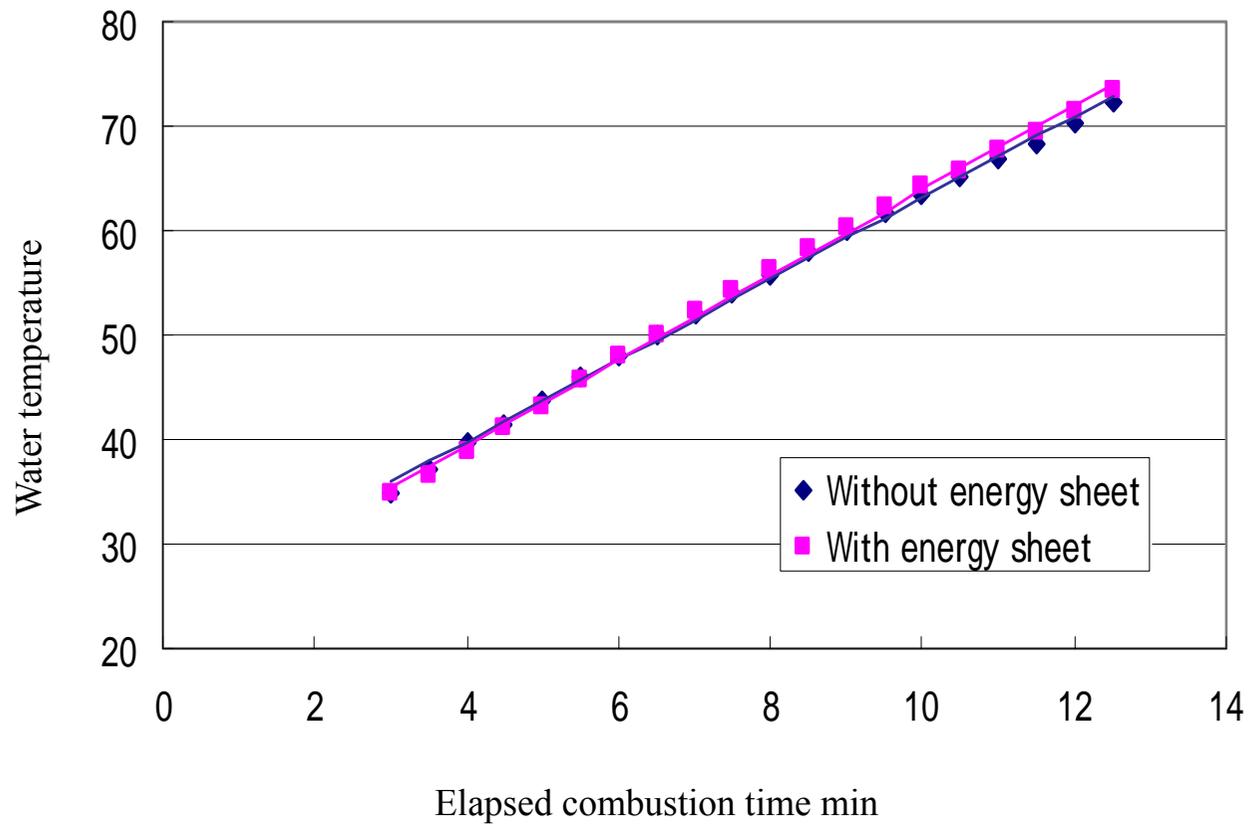


Fig.18 Water temperature rise of Town Gas at 1.71 air ratio

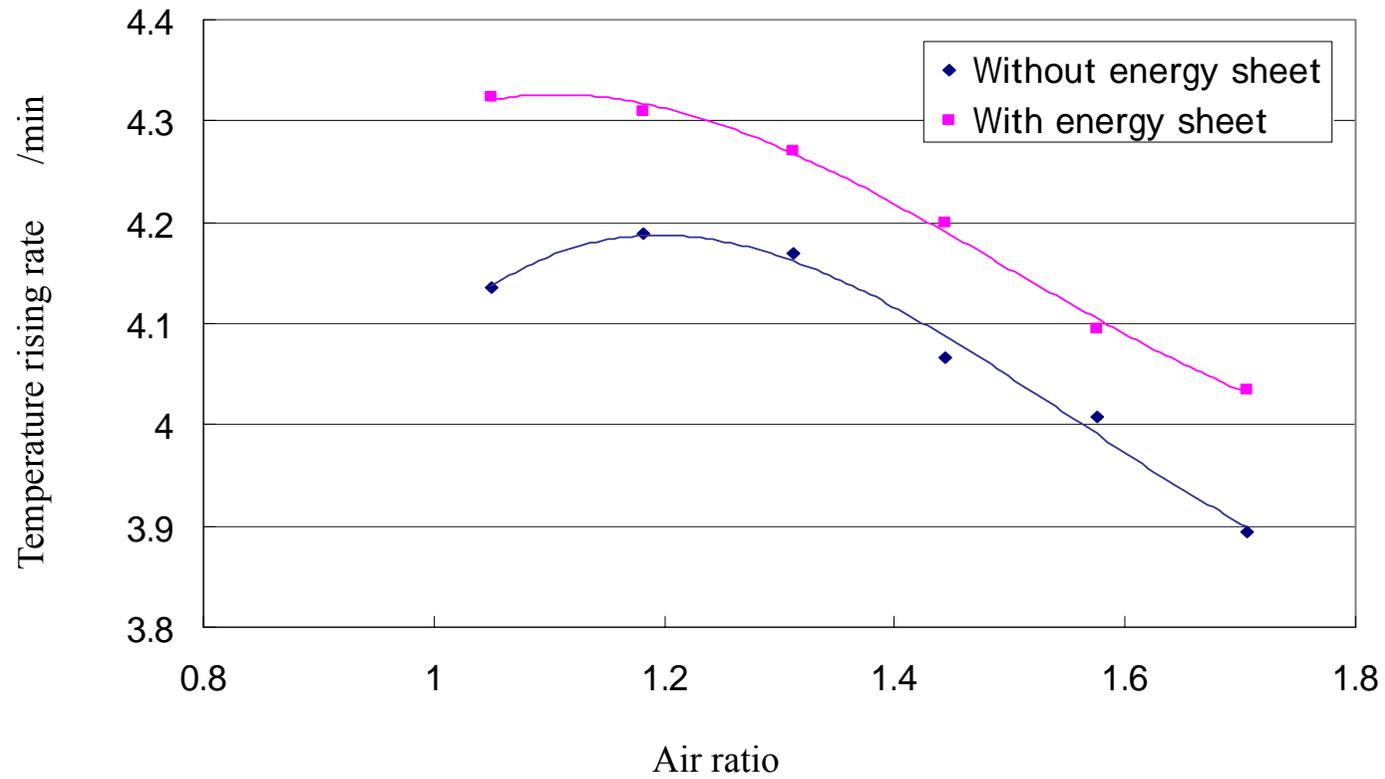


Fig.19 Temperature rising rate with and without electro-magnetic energy sheet against air ratio by Town Gas

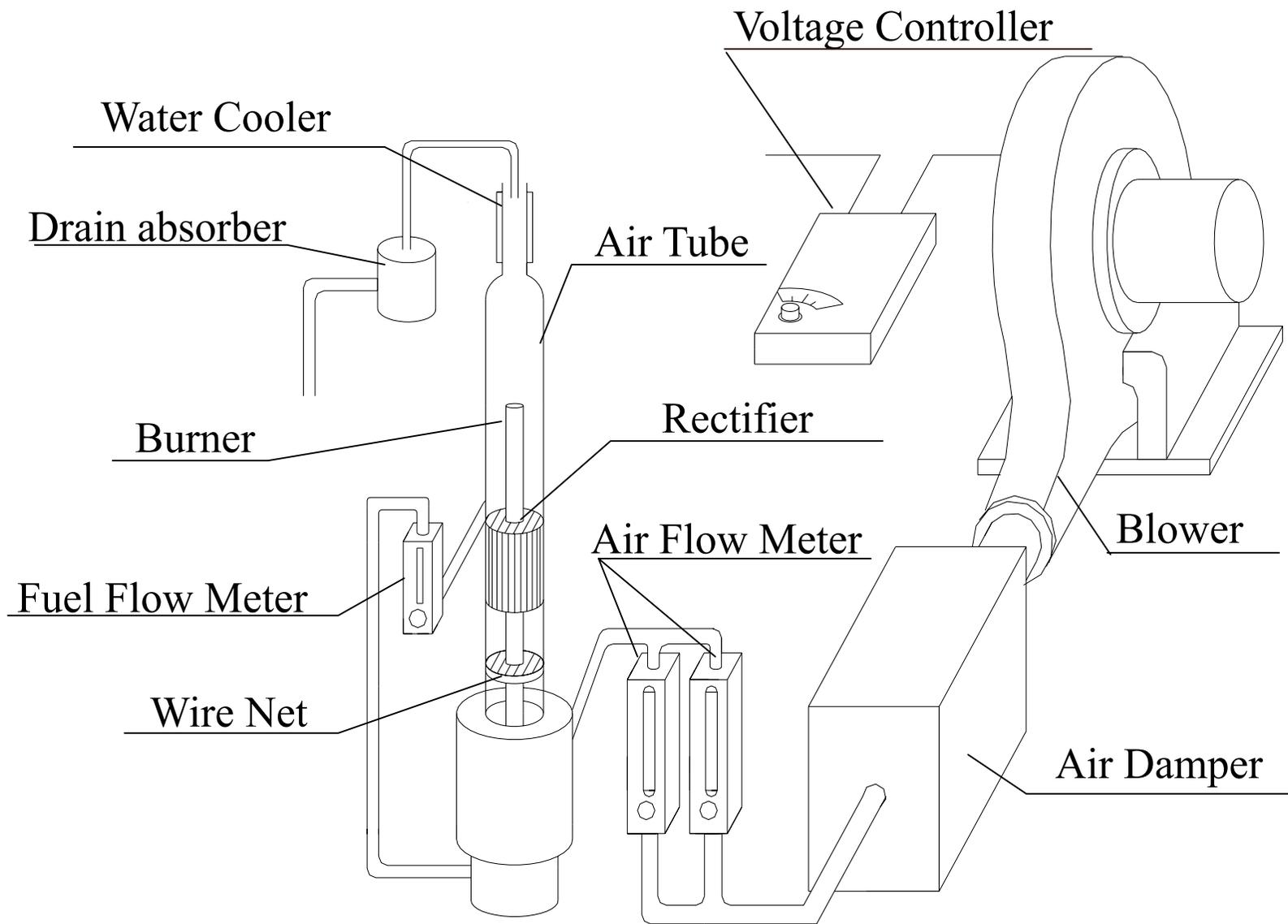


Fig.20 Experimental setup

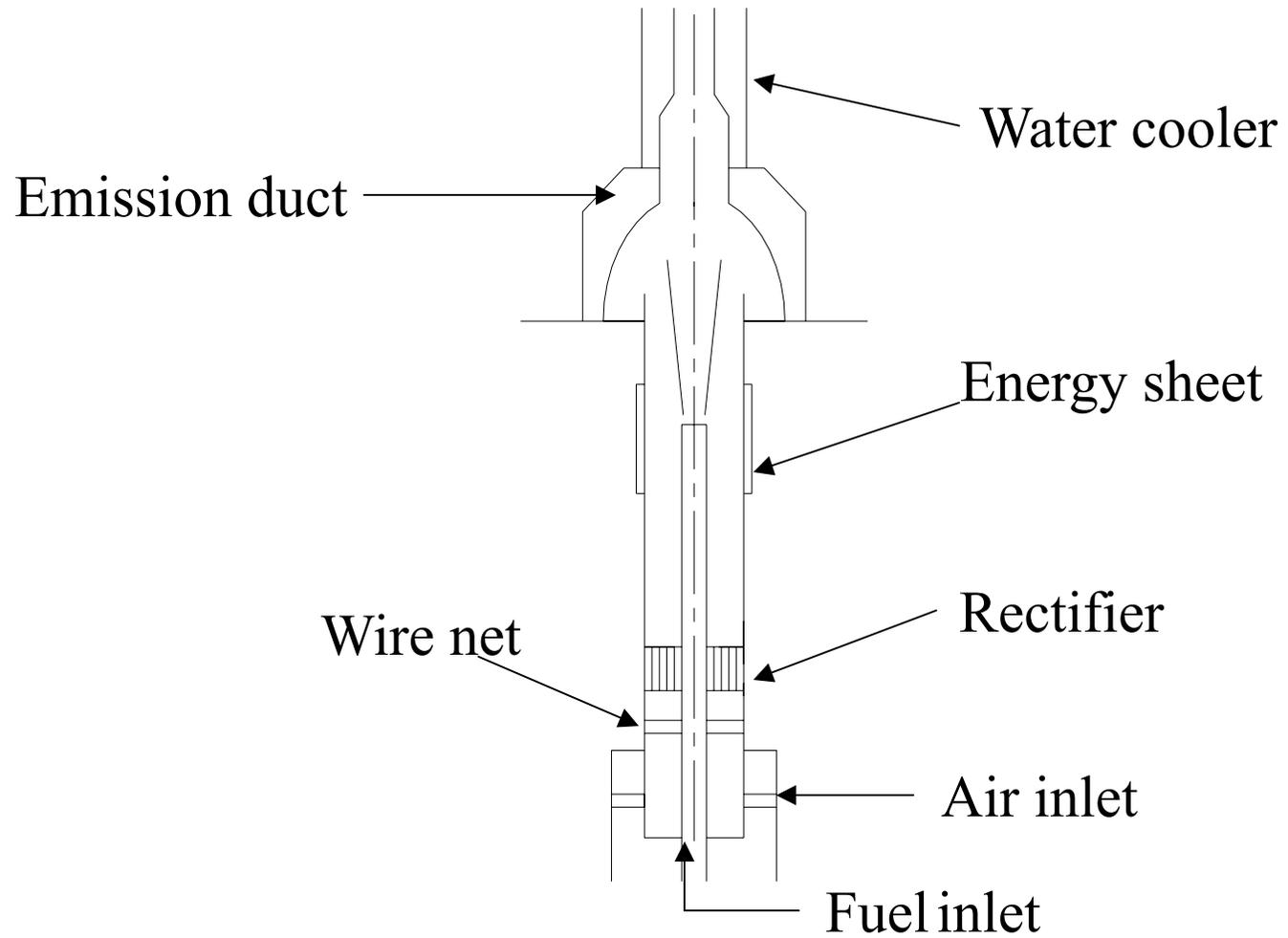


Fig.21 Derail of emission system



Fig.22 Gas analyzer

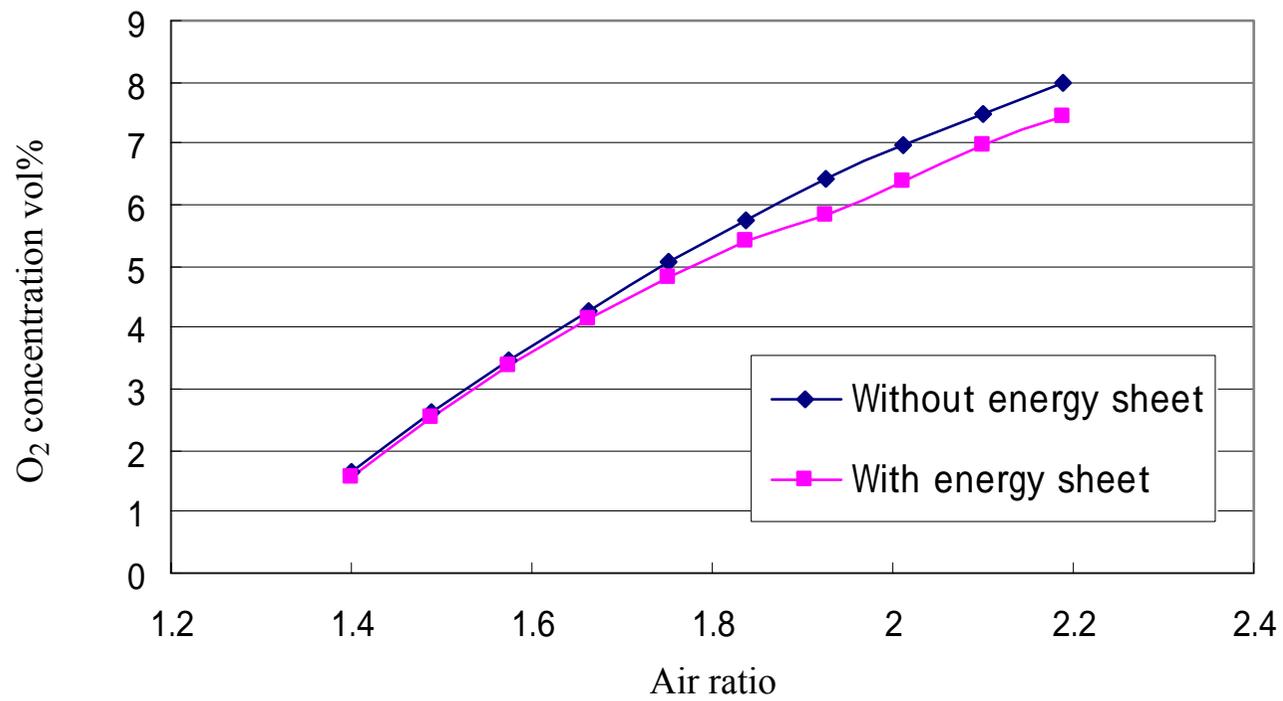


Fig.23 O₂ emission from DME combustion

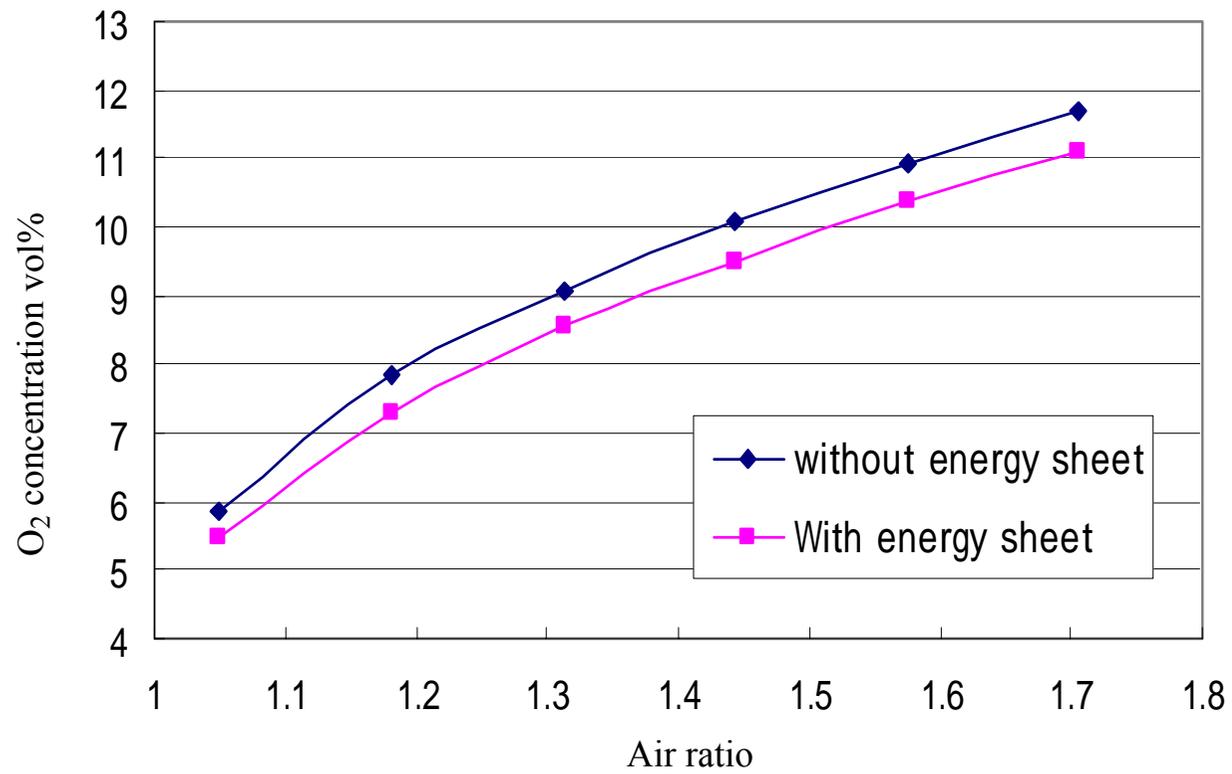


Fig.24 O₂ emission from Town Gas combustion

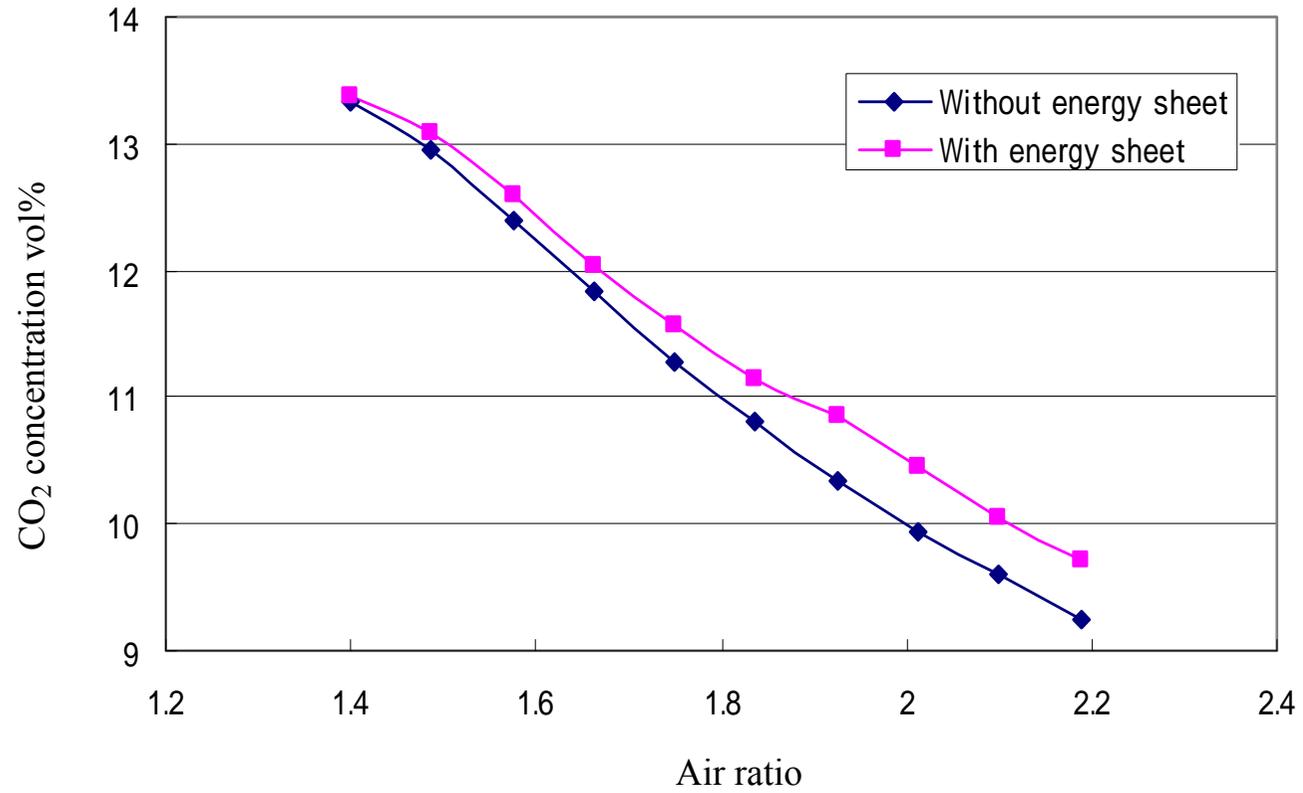


Fig.25 CO₂ emission from DME combustion

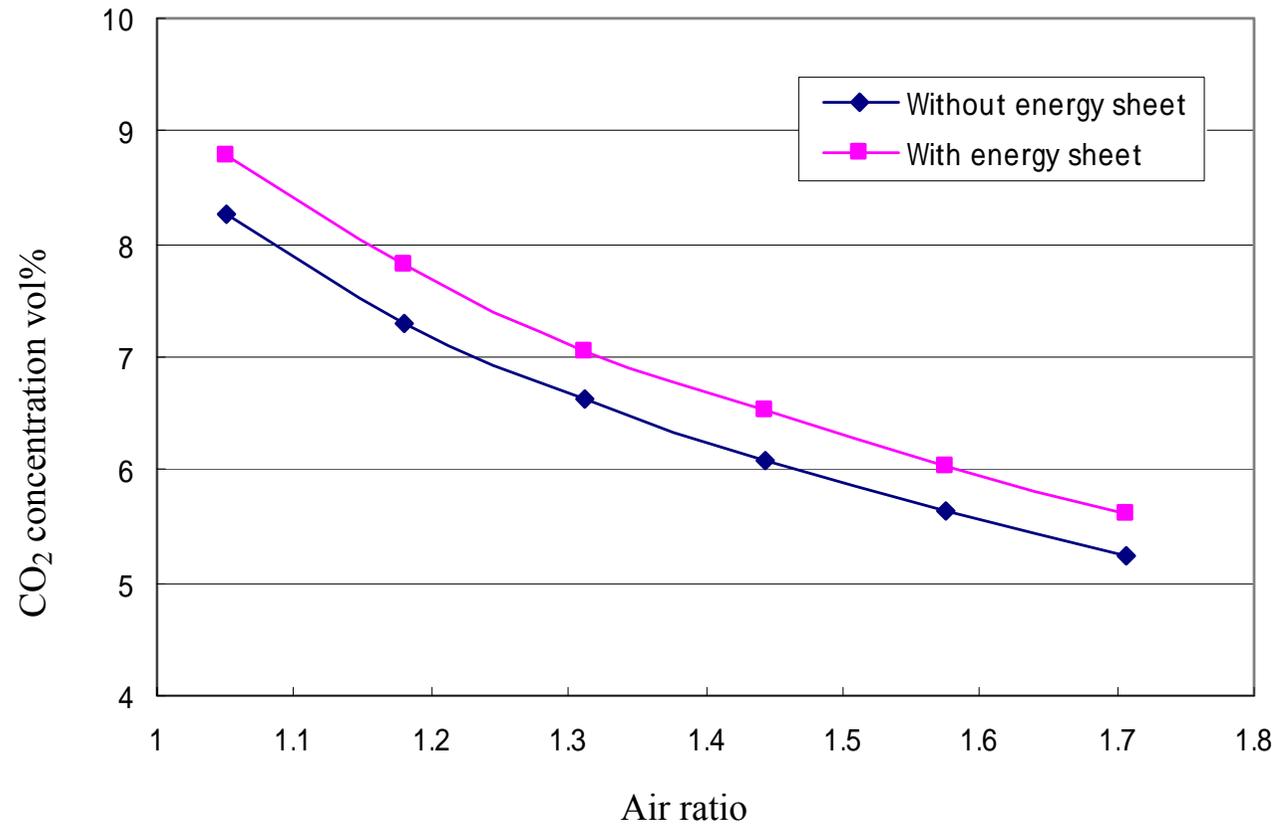


Fig.26 CO₂ emission from Town Gas combustion

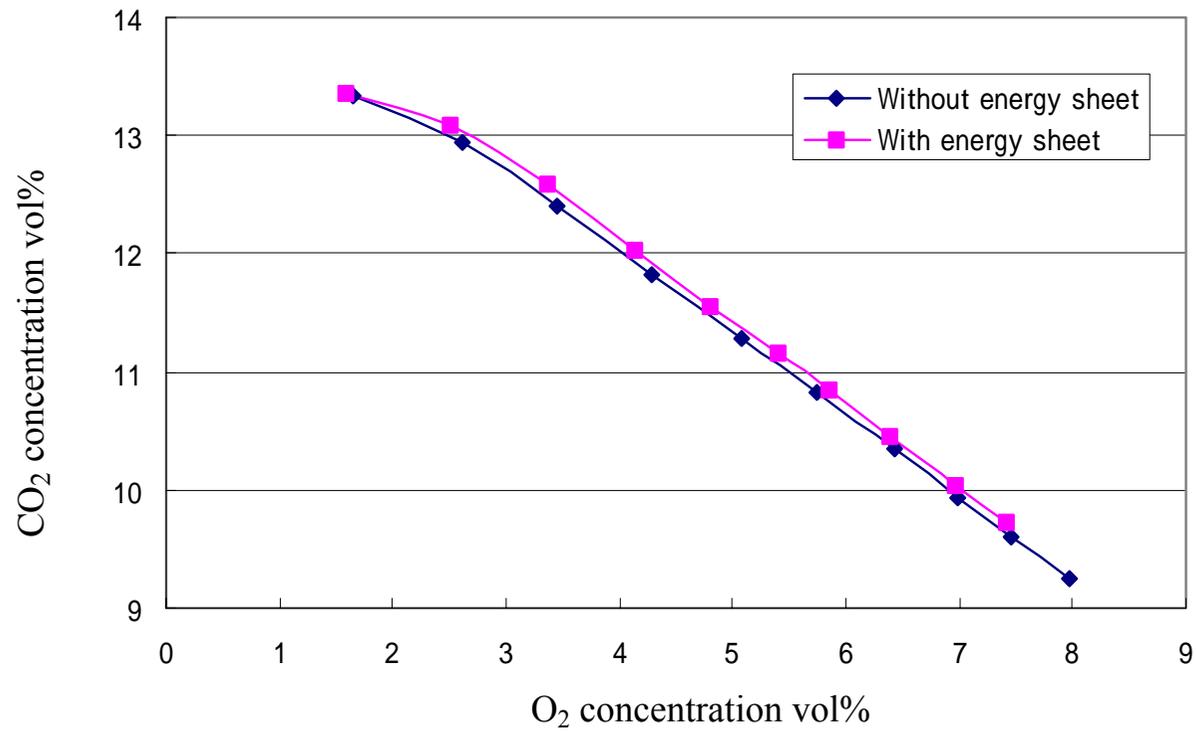


Fig.27 CO₂ emission with and without electric-magnetic energy sheet against O₂ concentration by DME

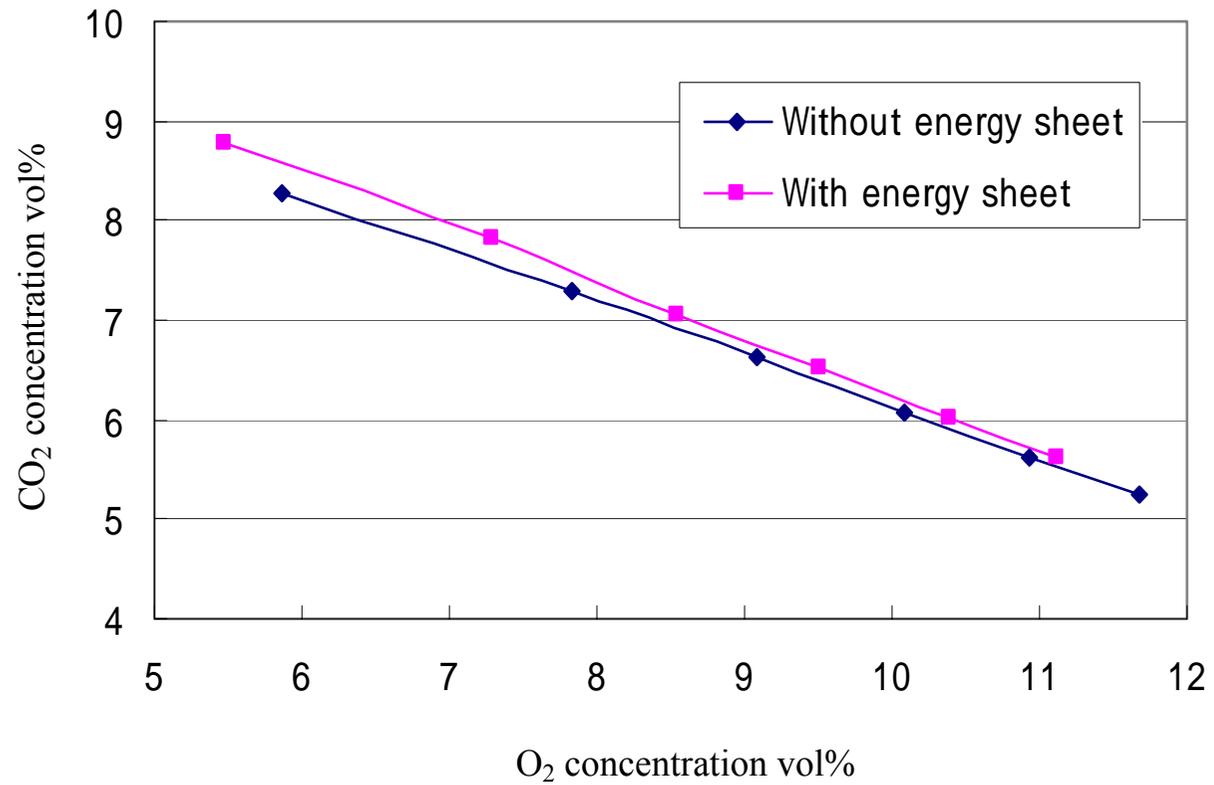


Fig.28 CO₂ emission with and without electric-magnetic energy sheet against O₂ concentration by Town Gas

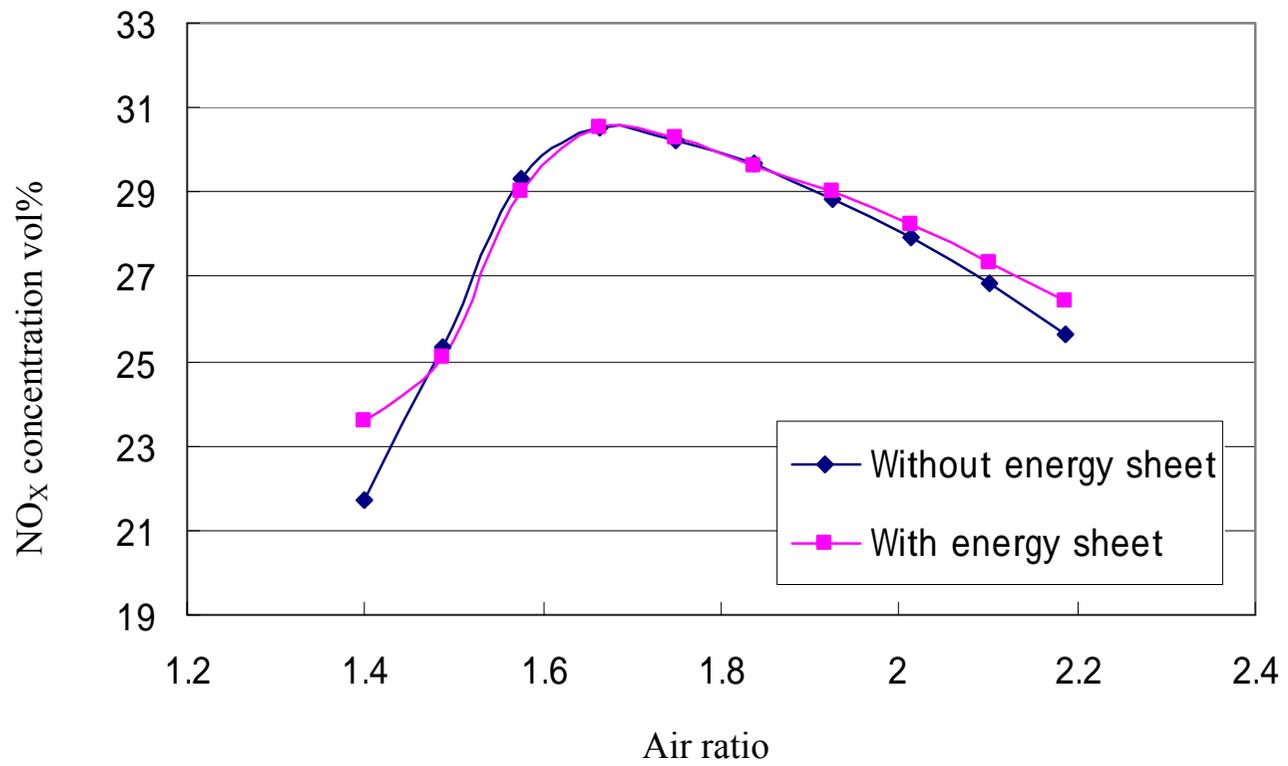


Fig.29 NO_x emission from DME combustion

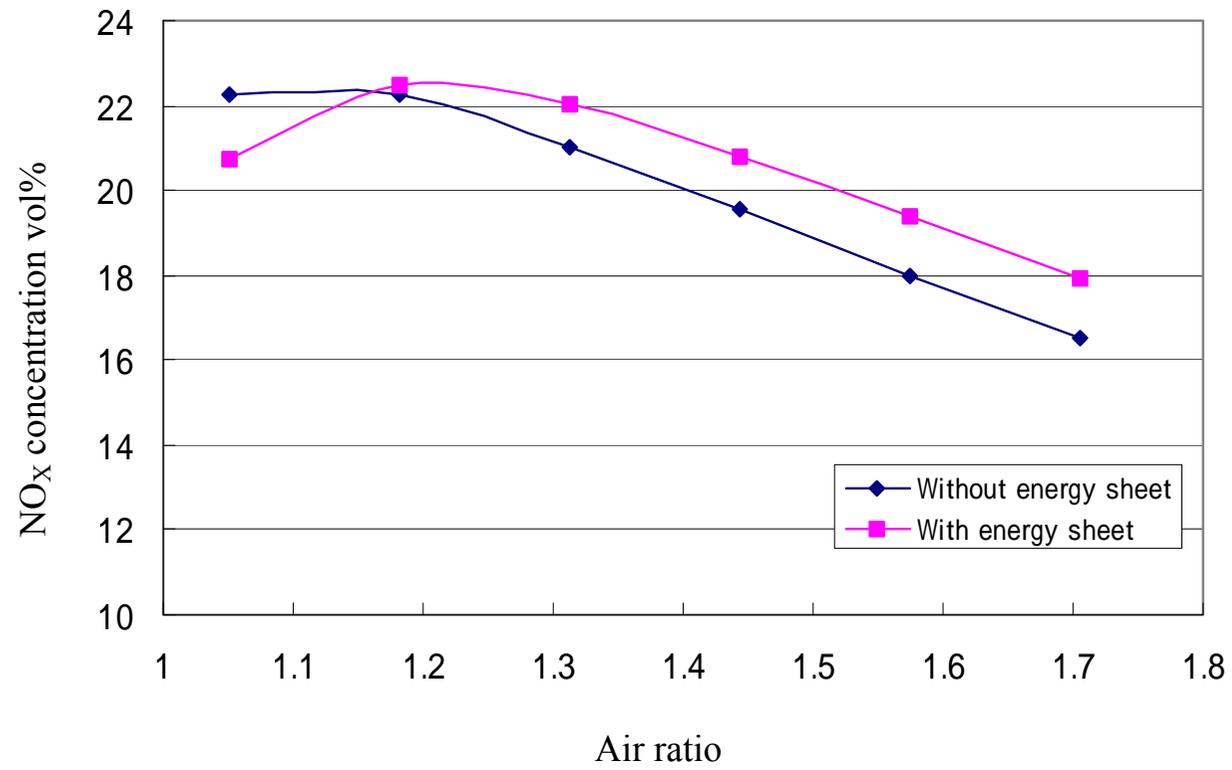


Fig.30 NO_x emission from DME combustion