

TESIS

**UJI PERFORMA KATALIS
PEROVSKITES (LaMnO_3 , LaCrO_3 , LaCoO_3)
UNTUK EFISIENSI DAN EMISI KOMPOR GAS LPG**

Oleh :
HERLIATI
NPM : 6400040195



**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
PROGRAM PASCASARJANA BIT
UNIVERSITAS INDONESIA**

Februari 2003

**UJI PERFORMA KATALIS
PEROVSKITES (LaMnO_3 , LaCrO_3 , LaCoO_3)
UNTUK EFISIENSI DAN EMISI KOMPOR GAS LPG**

Oleh :
HERLIATI
NPM : 6400040195



T
660.299 5
HER
4

**TESIS INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI MAGISTER TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
PROGRAM PASCASARJANA BIT
UNIVERSITAS INDONESIA**

Februari 2003

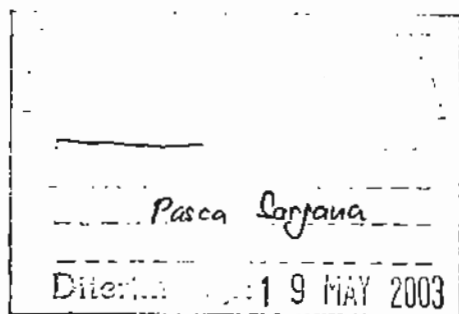
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul :

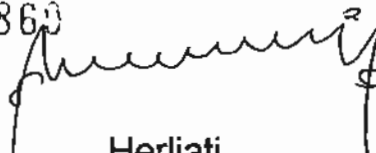
UJI PERFORMA KATALIS PEROVSKITES (LaMnO_3 , LaCrO_3 , LaCoO_3) UNTUK EFISIENSI DAN EMISI KOMPOR GAS LPG

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi **Magister Teknik (MT)** pada Program Studi Teknik Kimia Program Pascasarjana Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar magister di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Februari 2003



03860

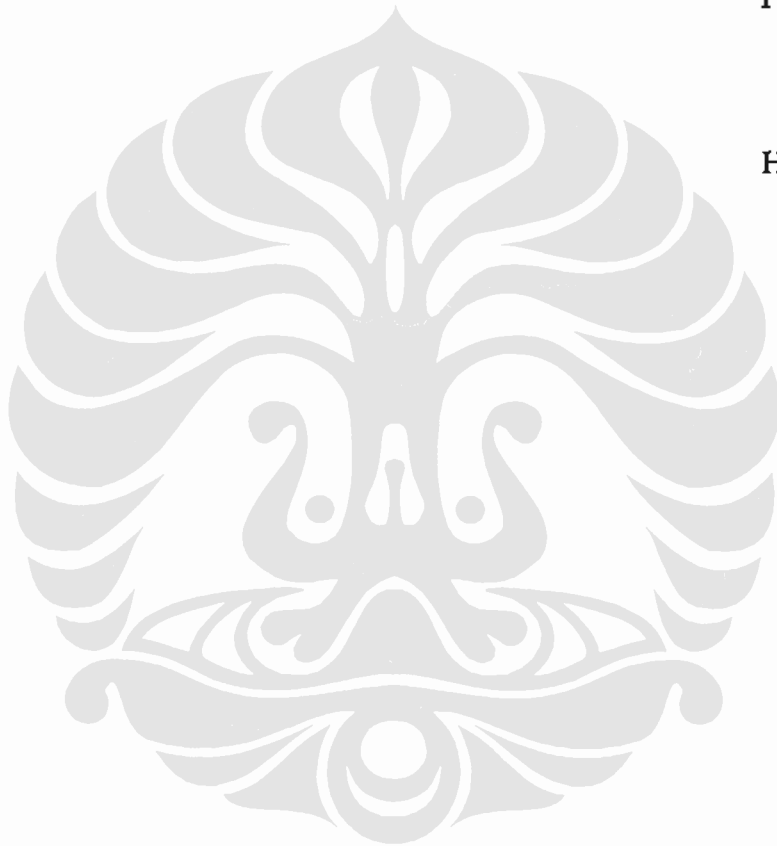

Herliati
NPM.6400040195

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna, oleh sebab itu penelitian lebih lanjut sangat diharapkan untuk memperoleh hasil penelitian yang lebih baik lagi. Akhirnya penulis berharap laporan penelitian ini bermanfaat bagi pembaca.

Depok, Februari 2003

Penulis

Herliati



ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari efek katalitik dari katalis jenis perovskite (LaMnO_3 , LaCrO_3 , LaCoO_3) yang dilapisi (*coating*) di atas permukaan material *stainless steel* (AISI 301) pada proses pembakaran kompor gas katalitik berbahan bakar LPG, sehingga emisi NO_x , CO dan hidrokarbon tak terbakar hampir nihil dan efisiensi energi lebih tinggi dibandingkan kompor gas konvensional (tanpa katalis).

Untuk mencapai tujuan tersebut, langkah-langkah penelitian laboratorium yang dilakukan adalah preparasi dan karakterisasi *top burner* katalitik serta uji kinerja kompor gas LPG yang meliputi uji efisiensi termal dan emisi polutan dengan variasi laju alir 700, 900, 1100 dan 1300 ml/menit untuk setiap jenis katalis yang dipilih.

Preparasi katalis dilakukan dengan metode sitrat sedangkan pelapisan katalis di atas permukaan substrat menggunakan metode *dip-coating* berulang. Pada penelitian ini, tahap pelapisan katalis perovskite LaCrO_3 , LaMnO_3 dan LaCoO_3 di atas permukaan *stainless steel* yang mengalami *pre-heating* pada suhu 900°C telah berhasil dilakukan dengan *loading* 2,01 % (w/w) untuk tiga kali pencelupan dan ketebalan lapisan 26-29 μm .

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *top burner* yang dilapisi katalis LaCrO_3 memperlihatkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan katalis LaMnO_3 dan LaCoO_3 baik dari aspek efisiensi termal kompor gas maupun dari aspek reduksi polutan CO dan UHC. Dengan katalis LaCrO_3 efisiensi termal kompor gas dapat meningkat sebesar 22,5 % sementara itu reduksi emisi polutan UHC yang dicapai adalah sebesar 18,25 ppmv (reduksi 50,23 %) untuk C_3 dan sebesar 12,65 ppm (32,66 %) untuk C_4 . Sayangnya penambahan *top burner* katalitik pada kompor gas belum dapat mereduksi emisi gas CO yang justru meningkat sebesar 13,09 ppm (29,08 %) dibandingkan dengan kompor konvensional selain itu juga meningkatkan konsentrasi emisi gas NO_x sebesar 4,5 ppmv (naik 128,6 %).



DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR SIMBOL	xii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Lingkup Penelitian	3
1.5 Metode Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Konsep Pembakaran	5
2.1.1 Reaksi Pembakaran	5
2.1.2 Nyala Pembakaran	10
2.1.3 Bahan Bakar LPG	14
2.1.4 Emisi Pembakaran	16
2.1.5 Efisiensi Termal	24
2.1.6 Faktor-faktor Emisi	25
2.2 Pembakaran Katalitik	27
2.3 Katalis Oksidasi	28
2.3.1 Struktur Fasa Aktif Jenis Perovskite	32
2.3.2 Teknik Pelapisan Sol-Gel	35
BAB III. PENELITIAN	
3.1.1 Metode Penelitian	37
3.1.2 Rancangan Percobaan	38

3.2	Alat dan Bahan Penelitian	40
3.2.1	Alat-Alat Penelitian	40
3.2.2	Bahan-Bahan Penelitian	41
3.3	Prosedur Penelitian	
3.3.1	Preparasi Katalis	41
3.3.1.1	Pembuatan Precursor	42
3.3.1.3	Pelapisan <i>Top Burner</i>	43
3.3.2	Karakterisasi Katalis	44
BAB VI. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		
4.1	Pembuatan <i>Top Burner</i>	45
4.2	Preparasi <i>Top Burner</i> katalitik	45
4.3	Hasil Karakterisasi	
4.3.1	Karakterisasi SEM	47
4.3.2	Karakterisasi EDAX (X-RAY)	49
4.3.3	Karakterisasi BET	51
4.4	Karakteristik Nyala Api	52
4.5	Power dan Efisiensi Termal	
4.5.1	Pengaruh Waktu Pemasakan	54
4.5.2	Pengaruh Laju Alir Bahan Bakar	56
4.5.3	Komparasi dengan Burner Konvensional	57
4.6	Konsentrasi Komponen Gas Buang	
4.6.1	Pengaruh Waktu Pemasakan	58
4.6.2	Pengaruh Laju Alir Bahan Bakar	62
4.6.3	Faktor-faktor Emisi	66
4.6.4	Komparasi dengan Burner Konvensional	67
BAB V. KESIMPULAN		71
DAFTAR PUSTAKA		73
LAMPIRAN		
LAMPIRAN A	: Kalibrasi GC FID, C ₃ dan C ₄	76
LAMPIRAN B	: Hasil Karakterisasi SEM dan XRD	79
LAMPIRAN C	: Hasil Perhitungan Efisiensi dan Emisi	85
LAMPIRAN D	: Contoh Perhitungan Efisiensi termal dan emisi	95

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1	Variasi temperatur <i>flame</i> terhadap rasio relatif λ 7
Gambar 2.2	Temperatur <i>flame</i> hidrokarbon dan udara sebagai fungsi entalpi total untuk berbagai rasio relatif dan H/C. 9
Gambar 2.3	Karakteristik nyala pada Bunsen 11
Gambar 2.4	Profil laju gas dan laju pembakaran di dalam tabung burner Bunsen 13
Gambar 2.5	Profil laju gas dan laju pembakaran di atas tabung burner bunsen 13
Gambar 2.6	Jalur Pembentukan nitrogen oksida dalam pembakaran 17
Gambar 2.7	Bentuk orbital-orbital pada molekul CO 19
Gambar 2.8	Skema ikatan CO dengan atom logam 20
Gambar 2.9	Pengaruh <i>power density</i> pada emisi CO dan NO 21
Gambar 2.10	Pengaruh koefisien relatif bahan bakar-udara pada emisi CO dan NO 22
Gambar 2.11	Emisi NO _x sebagai fungsi <i>excess air</i> (E _a) untuk beberapa nilai Q 30
Gambar 2.12	Emisi CO sebagai fungsi <i>excess air</i> (E _a) untuk beberapa nilai Q 31
Gambar 2.13	Emisi HC sebagai fungsi <i>excess air</i> (E _a) 31
Gambar 2.14	Struktur Perovskite 32
Gambar 2.15	Susunan <i>close packed</i> ion-ion A dan O dengan jari-jari yang sama dalam struktur senyawa AO ₃ 33
Gambar 2.16	Skema proses <i>dip-coating</i> 36
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian 37
Gambar 3.2	Sistem pengukuran efisiensi termal kompor 38
Gambar 3.3	Sistem pengukuran emisi gas 39
Gambar 4.1	<i>Top Burner</i> Plat silang 45
Gambar 4.2	Hasil karakterisasi SEM 48
Gambar 4.3	Hasil karakterisasi X-RAY (EDAX) 50
Gambar 4.4	Hasil karakterisasi BET 51
Gambar 4.5	Profil temperatur nyala fungsi waktu pembakaran pada top burner LaCrO ₃ 52

Gambar 4.6	Pengaruh input power terhadap efisiensi Termal pembakaran	53
Gambar 4.7	Profil efisiensi termal pada burner konvensional	54
Gambar 4.8	Efisiensi termal kompor gas sebagai fungsi waktu pemasakan pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit	55
Gambar 4.9	Efisiensi termal kompor gas sebagai fungsi waktu pemasakan pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit (dalam bentuk kolom)	55
Gambar 4.10	Efisiensi termal kompor sebagai fungsi laju bahan bakar	56
Gambar 4.11	Pengaruh laju alir bahan bakar terhadap waktu pemasakan	57
Gambar 4.12	Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi C_3 pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit	58
Gambar 4.13	Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi C_4 pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit	59
Gambar 4.14	Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi C_3 dan C_4 pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit untuk <i>top burner</i> $LaCrO_3$	59
Gambar 4.15	Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi CO_2 laju alir bahan bakar 1300 ml/menit	60
Gambar 4.16	Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi CO laju alir bahan bakar 1300 ml/menit	61
Gambar 4.17	Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi NO laju alir bahan bakar 1300 ml/menit	62
Gambar 4.18	Pengaruh laju bahan bakar terhadap (a) emisi C_3 , (b) emisi C_4 pada menit ke-10	63
Gambar 4.19	Pengaruh laju bahan bakar terhadap (a) emisi CO_2 menit ke-15, (b) emisi CO pada menit ke-20	64
Gambar 4.20	Pengaruh laju bahan bakar terhadap NO menit ke-15	65
Gambar 4.21	Pengaruh T nyala terhadap konsentrasi NO fungsi dari laju alir pada menit ke-15	66

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi produk pada kesetimbangan dari pembakaran propana-udara 8
Tabel 2.2	<i>Flammability limit</i> beberapa bahan bakar dalam udara dan oksigen 11
Tabel 2.3	Nilai kalor untuk beberapa bahan bakar 16
Tabel 2.4	Konsentrasi (ppmv) emisi untuk kompor gas LPG konvensional 22
Tabel 2.5	Power input dan efisiensi termal untuk bahan bakar gas dan liquid 23
Tabel 2.6	Faktor-faktor emisi (g/kg) dan emisi GHG (Tg/th) untuk LPG 25
Tabel 3.1	Komposisi <i>Stainless steel</i> tipe AISI 301 37
Tabel 4.1	Deposisi katalis pada <i>top burner stainless steel</i> 47
Tabel 4.2	Kondisi <i>loading</i> setelah <i>top burner</i> digunakan 48
Tabel 4.3	Hasil Analisa X-Ray 50
Tabel 4.4	Hasil karakterisasi BET 52
Tabel 4.5	Input power dan efisiensi Termal pembakaran katalitik dan non-katalitik 54
Tabel 4.6	Komparasi antar <i>top burner</i> katalitik dengan non katalitik dan port konvensional 59
Tabel 4.7	Faktor-faktor emisi 67
Tabel 4.8	Reduksi Emisi C ₃ 68
Tabel 4.9	Reduksi Emisi C ₄ 68
Tabel 4.10	Reduksi Emisi CO 69
Tabel 4.11	Reduksi Emisi NO 69
Tabel 4.12	Kenaikan Emisi CO ₂ 70

DAFTAR SIMBOL

λ = Koeffisien relatif udara bahan bakar

η = Efisiensi

Q = kalor, kJ

m = massa, kg

c_p = panas jenis, kkal/kg °C

V = volume, ml

V_{fuel} = laju alir bahan bakar, ml/menit

t_r = Temperatur akhir pembakaran

t_o = Temperatur awal pembakaran

$(W_f - W_o)$ = massa air dalam teko yang teruapkan selama dimasak

T_{flame} = Temperatur nyala, °C

HV = Heating value bahan bakar, kJ/mol

L = Kalor laten penguapan air, kJ/kg



BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

L1. LATAR BELAKANG MASALAH

Bahan bakar gas banyak dipakai untuk sektor rumah tangga dan industri terutama gas bumi (metana) dan LPG karena mempunyai beberapa keunggulan seperti mudah pembakarannya, nilai kalor yang tinggi dan ramah lingkungan. Sampai saat ini pemakaian bahan bakar gas sektor rumah tangga di Indonesia didominasi oleh LPG karena transmisi gas bumi belum tersedia untuk setiap daerah perkotaan. Walaupun demikian, pembakaran gas bumi/LPG di kompor gas belum sempurna karena reaksi pembakaran berlangsung dalam fase gas (homogen) yang sulit mengendalikan terbentuknya NO_x , CO dan hidrokarbon yang tidak terbakar (Sadamori, 1999; Turns, 1996), apalagi bila dapur sempit atau tidak mempunyai ventilasi yang baik maka kemungkinan terjadi akumulasi polutan yang berdampak negatif bagi kesehatan, juga penyebab terjadinya hujan asam.

Dari sisi regulasi lingkungan, polusi udara merupakan permasalahan global dan teknologi reduksi polutan udara (kompor gas katalitik) menjadi topik yang menarik untuk dikembangkan guna menjawab tantangan nilai ambang batas yang menunjukkan kecenderungan semakin ketat menuju *zero emission* (Blazowski, 1975). Sebagai contoh, regulasi ambang batas NO_x untuk pembakaran gas sektor rumah tangga di beberapa negara adalah sebagai berikut : Australia: 44 ppm NO_2 (gas bumi dan LPG), Austria: 114 ppm $\text{NO} + \text{NO}_2$ (gas bumi), 176 ppm $\text{NO} + \text{NO}_2$ (LPG), Jerman: 34 ppm NO_x total (gas bumi), 52 ppm NO_x total (LPG), Inggris: 5 ppm NO dan 1 ppm NO_2 (gas bumi) (Kobussen, 1994). Sedangkan menurut BIS (1984) limit untuk emisi rasio CO/CO_2 adalah 0,02 sedangkan untuk NO_x/CO_2 adalah 0.007 (Crutzen, 1990).

Berbagai upaya telah dikembangkan untuk dapat meningkatkan efisiensi termal namun belum diiringi dengan penurunan emisi polutan yang maksimal. Pembakaran katalitik dapat menjadi integrasi antara alat pembakaran dan katalis, dengan karakteristik sebagai berikut:

- ♦ Merupakan reduksi emisi *direct process* atau *in situ combustion* bukan *post combustion*.
- ♦ Mereduksi emisi polutan seperti CO dan UHC (hidrokarbon yang tidak terbakar) melalui reaksi yang lebih ke arah oksidasi total serta emisi gas polutan NO_x melalui penurunan temperatur nyala.

- ♦ Dapat meningkatkan *power density* atau kapasitas panas spesifik (kalor/waktu.luas) dengan mempercepat terjadinya reaksi pembakaran melalui penurunan energi aktivasi reaksi sehingga efisiensi termal meningkat.

Pembakaran katalitik ini diharapkan dapat menjadi salah satu alternatif cara penurunan emisi polutan yang akan diikuti dengan peningkatan efisiensi kompor gas. Peran katalis adalah menurunkan energi aktivasi reaksi pembakaran sehingga temperatur pembakaran lebih rendah yang akan dapat menghindari terbentuknya NO_x, dan dapat mengoksidasi dengan kuat hidrokarbon (LPG) dan CO menjadi CO₂ dan uap air, katalis memiliki kemampuan mengkemosorpsi oksigen menjadi spesi oksigen teradsorpsi atau spesi aktif pada permukaan katalis yang mempunyai daya oksidasi yang sangat kuat. Reaksi pembakaran sebagian besar berlangsung pada permukaan katalis (reaksi heterogen). Jika katalis dilapisi pada permukaan media seperti stainless steel dengan desain *burner* yang memberikan kehilangan panas minimum maka kompor gas katalitik memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi disamping reaksi pembakaran lebih sempurna dan lebih stabil sehingga dapat menghindari adanya bahaya *flashback* (Sadamori, 1999; Tabata, 1996; Nayestakani, 1995). Untuk lebih meningkatkan efisiensi energi telah dilakukan modifikasi *burner* terutama untuk mereduksi kehilangan energi ke udara sekeliling (Widodo, et.al, 2002).

Fasa aktif katalis dari logam transisi dan logam tanah jarang (*rare earth metal*) dalam bentuk oksida kompleksnya yang disebut dengan perovskite, akhir-akhir ini telah menarik perhatian untuk aplikasi reaksi oksidasi sebagai alternatif katalis-katalis logam mulia. Menurut Janos (1994), oksida campuran tipe *perovskite* mempunyai aktifitas yang cukup tinggi untuk reaksi oksidasi total. Katalis tipe *perovskite* memiliki stabilitas fisika, kimia dan termal yang bagus pada suhu di atas 1100°C (H Arai, 1986, 1996), selain itu juga tahan terhadap racun sebagai efek senyawa sulfur yang terdapat di dalam bahan bakar (I. Cerri, 2000). Menurut U.S Patent 5,939,354, diketahui bahwa material-material tipe *perovskite* sangat baik untuk reaksi oksidasi dan reduksi katalitik sehubungan dengan kontrol terhadap emisi gas buang kendaraan. Hasil penelitian yang dilakukan oleh I Cerri et al (2000) menggunakan katalis *perovskite* LaMnO₃ yang terdispersi di atas permukaan *FeCrAlloy burner* untuk pembakaran metana memperlihatkan reduksi emisi NO_x CO dan UHC yang signifikan.

I.2. PERUMUSAN MASALAH

Untuk aplikasi pembakaran katalitik pada kompor gas LPG menggunakan katalis perovskite yang dilapiskan di atas permukaan *top burner* plat silang dari bahan *stainless steel*, terdapat permasalahan yang harus dijawab, yaitu apakah keberadaan *top burner* yang dilapisi katalis tersebut dapat meningkatkan kinerja kompor dalam hal reduksi emisi polutan dan efisiensi termal ?

Dalam analisa yang dilakukan terhadap kinerja kompor gas, agar efek yang dihasilkan betul-betul merupakan efek katalitik maka pada penelitian ini diusahakan agar dihasilkan bentuk *flame* yang sama untuk setiap percobaan dengan membuat geometri *top burner* seseragam mungkin.

I.3. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembakaran katalitik menggunakan katalis perovskite LaCrO_3 , LaMnO_3 , LaCoO_3 yang dilapiskan di atas permukaan *top burner* plat silang berbahan *stainless steel*. Selanjutnya adalah memilih diantara ketiga katalis perovskite tersebut yang paling baik dalam meningkatkan kinerja kompor gas.

I.4. LINGKUP PENELITIAN

Ruang lingkup penelitian ini adalah :

1. Bahan bakar gas LPG dengan komposisi 0,46 % (w/w) Propana dan 0,54 % Eutana (Spesifikasi dari Pertamina).
2. *Port* konvensional yang berupa *port* logam kuningan dari kompor gas komersial merk Rinnai, *port bunsen* dari logam kuningan, dan *top burner* berbentuk plat silang berbahan *stainless steel* (AISI 301) katalitik dan non-katalitik.
3. Menggunakan *port bunsen* dibagian bawah dan *top burner* plat silang berbahan *stainless steel* dibagian atas.
4. Preparasi katalis perovskite LaMnO_3 , LaCrO_3 , LaCoO_3 dengan metode sitrat.
5. Pelapisan katalis perovskite LaMnO_3 , LaCrO_3 , LaCoO_3 , pada *top burner* dilakukan dengan metode dip-coating berulang.
6. Karakterisasi katalis menggunakan metode BET, SEM, dan EDAX.

7. Kinerja kompor diuji dengan melihat pengaruhnya terhadap
 - a. Reduksi emisi gas polutan, yaitu dengan mengetahui konsentrasi gas CO, CO₂, NO_x dan UHC (C₃ dan C₄) dalam gas buang hasil pembakaran dengan dan tanpa katalis.
 - b. Efisiensi termal kompor, yaitu dengan membandingkan kalor yang diterima sistem (air dalam teko terisolasi) terhadap kalor yang diberikan bahan bakar.

1.5 METODE PENELITIAN

Variabel-variabel yang ditinjau

- a. Variabel bebas yang divariasikan adalah laju alir bahan bakar (V_{fuel} , ml/min), *top burner* plat silang berbahan *stainless steel* katalitik dan non-katalitik.
- b. Variabel antara yang ditinjau adalah temperatur nyala (T_{flame} , °C), waktu pemasakan (t_m , menit), konsentrasi polutan ((CO, CO₂, NO_x, UHC) dalam gas buang, ppmv).
- c. Variabel tergantung yang ditinjau adalah efisiensi termal (η , %) dan reduksi polutan (%).
- d. Variabel tetap adalah katalis senyawa perovskite LaMnO₃, LaCrO₃, LaCoO₃, (konsentrasi 1 M).

Tahap Penelitian :

1. Preparasi *top burner* plat silang berbahan *stainless steel* (AISI 301).
2. Preparasi katalis perovskite dengan metode sitrat.
3. Pelapisan *top burner* yang telah di-*cleaning* dengan teknik *dip-coating*.
4. Uji kinerja kompor gas, yaitu berupa uji efisiensi dan emisi



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. KONSEP PEMBAKARAN

II.1.1. Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah suatu reaksi oksidasi yang diikuti dengan timbulnya cahaya dan panas secara cepat (Vandever et.al, 1965) sedangkan reaksi oksidasi itu sendiri didefinisikan sebagai reaksi antara oksigen dengan *combustible materials* yang berlangsung secara lambat tanpa menghasilkan cahaya dan panas dengan cepat. Gas-gas yang dapat terbakar (*gaseous combustible materials*) secara prinsip terdiri dari hidrokarbon (HC), CO₂, SO_x dan H₂. Tiga syarat penting berlangsungnya pembakaran adalah :

- Adanya suplay oksigen
- Adanya bahan yang dapat terbakar
- Adanya energi panas untuk ignisi/pengapian

Suplay oksigen dapat dilakukan dengan mencampurkan bahan bakar sebagai *combustible material* dengan oksigen murni atau sumber oksigen seperti udara.

Berdasarkan proses pencampuran tersebut, pembakaran terdiri atas :

1. Pembakaran *premixed*, dalam pembakaran ini udara dan bahan bakar dicampur terlebih dahulu sebelum terbakar. Pembakaran katagori ini dapat diterapkan dalam sistem tertutup, seperti motor bakar, dan turbin gas. Dalam pembakaran ini dimungkinkan pengaturan rasio bahan bakar terhadap udara sehingga dapat mengendalikan kadar emisi yang dihasilkan oleh pembakaran.
2. Pembakaran *unpremixed*, dalam pembakaran ini bahan bakar dan udara dibakar bersamaan tanpa dicampur terlebih dahulu. Pembakaran katagori ini diterapkan dalam sistim terbuka dimana oksigen yang diperlukan diambil dari udara secara langsung dan bercampur dengan bahan bakar.

Jumlah udara dibandingkan terhadap jumlah bahan bakar (*fuel*) dinyatakan oleh rasio udara-bahan bakar yang disingkat dengan notasi (A/F). Diketahui bahwa setiap bahan bakar mempunyai nilai (A/F) tersendiri yang menyatakan seberapa besar rasio udara dan bahan bakar yang minimum agar reaksi pembakaran dapat terjadi. Perbandingan tersebut dinyatakan sebagai (A/F)_{teoritis} dengan persamaan (Thumann, 1988):

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{teoritis} = \frac{M_A}{M_F} = \frac{4,76a}{x} \frac{W_A}{W_F} \quad (2.1)$$

dimana:

M_A = Massa Udara

M_F = Massa bahan bakar

W_A = Berat Molekul Udara

W_F = Berat molekul bahan bakar

a = mol oksigen

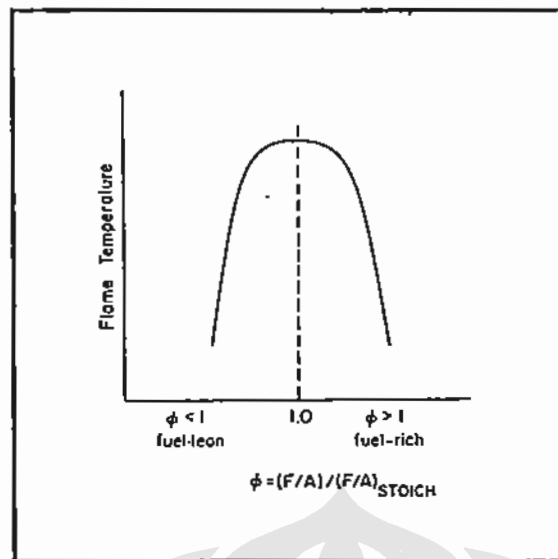
Namun kenyataannya, nilai (A/F) setiap bahan bakar berbeda-beda tergantung pada karakteristiknya sehingga kita akan menemui kesulitan menentukan besarnya (A/F) dalam pembakaran tertentu. Kondisi operasi pembakaran dari berbagai jenis bahan bakar disamakan sehingga dapat digunakan koefisien relatif (A/F) yang biasa dilambangkan dengan λ , dengan persamaan (Turns, 1996):

$$\lambda = \frac{(A/F)_{aktual}}{(A/F)_{teoritis}} \quad (2.2)$$

berdasarkan parameter rasio relatif (A/F) ini, pembakaran dapat terjadi pada kondisi :

- ♦ Rasio *lean* ($\lambda < 1$) atau biasa disebut dengan udara berlebih (*excess air*), pada kondisi ini udara yang ada lebih banyak dibandingkan yang diperlukan secara stoikiometris untuk bereaksi dengan sejumlah mol bahan bakar tertentu.
- ♦ Rasio stoikiometris ($\lambda = 1$), pada kondisi ini udara tepat atau hampir setara secara mol dengan bahan bakar.
- ♦ Rasio *rich* ($\lambda > 1$) atau bahan bakar berlebih, pada kondisi ini bahan bakar yang ada lebih banyak dibandingkan yang diperlukan secara stoikiometris.

Sehubungan dengan temperatur *flame*, menurut Irvin G. (1996), temperatur *flame* sangat dipengaruhi oleh rasio relatif bahan bakar-udara (λ) disamping rasio hidrogen-karbon (H/C) di dalam bahan bakar seperti terlihat pada Gambar 2.1 dan 2.2. Nilai temperatur *flame* yang terlihat pada Gambar 2.2. memperlihatkan kecenderungan bahwa rasio H/C mempunyai efek yang lebih besar pada sistim *rich* ($\lambda > 1$)



Gambar 2.1 Variasi temperatur *flame* terhadap rasio relatif λ (Irvin G. 1996)

Rasio relatif (λ) juga sangat menentukan gas buang hasil pembakaran. Tabel 1 memperlihatkan hubungan antara rasio relatif (λ) dengan gas buang hasil pembakaran. Diperlihatkan bahwa, pada sistem *lean* tidak dihasilkan gas CO tetapi dihasilkan gas NO dan gas CO₂ yang dihasilkan lebih banyak dibandingkan dengan sistem *rich*. Sedangkan pada sistem *rich*, gas CO yang dihasilkan paling banyak tetapi menghasilkan gas CO₂ paling sedikit dan tidak menghasilkan gas NO. (Irvin Glassman, 1996).

Menurut Vandever et, al (1965) klasifikasi proses pembakaran seperti di bawah ini.

- Complete Combustion*, terjadi apabila semua unsur C, H, dan S yang terkandung dalam bahan bakar bereaksi membentuk CO₂, H₂O, dan SO₂. Pembakaran ini umumnya dapat dicapai pada kondisi pembakaran udara berlebih.
- Perfect Combustion*, terjadi apabila jumlah bahan bakar dan oksidatornya sesuai dengan reaksi stoikiometris. Campuran dikatakan stoikiometris jika jumlah oksigen dalam campuran tepat untuk bereaksi dengan unsur C, H, dan S membentuk CO₂, H₂O, dan SO₂.
- Incomplete Combustion*, terjadi apabila proses pembakaran bahan bakar menghasilkan produk antara seperti CO, H₂, dan aldehyd, disamping CO₂, H₂O, dan N₂ (jika oksidatornya dalam udara). Pembakaran parsial dapat terjadi karena suplai oksidatornya terbatas atau kurang dari jumlah yang diperlukan, nyala ditiup dan dihembus, nyala didinginkan dengan dikenai benda/permukaan dingin, pencampuran bahan bakar dan oksidatornya tidak sempurna.

- d. *Spontaneous Combustion*, terjadi apabila bahan bakar mengalami oksidasi secara perlahan sehingga kalor yang dihasilkan tidak terlepas, menyebabkan temperatur bahan bakar naik secara perlahan sampai mencapai titik bakarnya (*ignition point*) hingga bahan bakar habis terbakar dan menyala.

Tabel 2.1 Komposisi produk pada kesetimbangan dari pembakaran propana-udara
(Irvin Glassman, 1996)

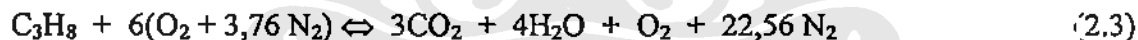
Spesi \ λ	0.6	1	1.5
CO	0	0.0125	0.1041
CO ₂	0.072	0.1027	0.0494
H ₂ O	0.096	0.1483	0.1382
NO	0.002	0.0023	0
H ₂	0	0.0004	0.0003

Dari klasifikasi pembakaran di atas kita dapat melihat beberapa persamaan reaksi pembakaran yang mungkin terjadi antara hidrokarbon LPG (propana-butana) sebagai bahan bakar dan udara sebagai oksidatornya yaitu sebagai berikut :

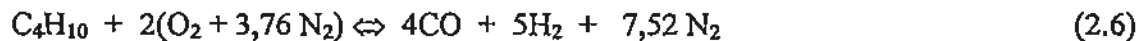
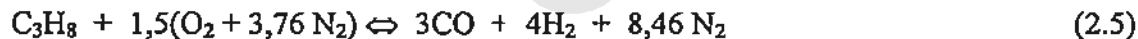
♦ Oksidasi total stoikiometri



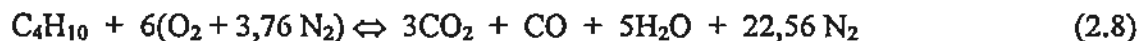
♦ Oksidasi total dengan udara berlebih

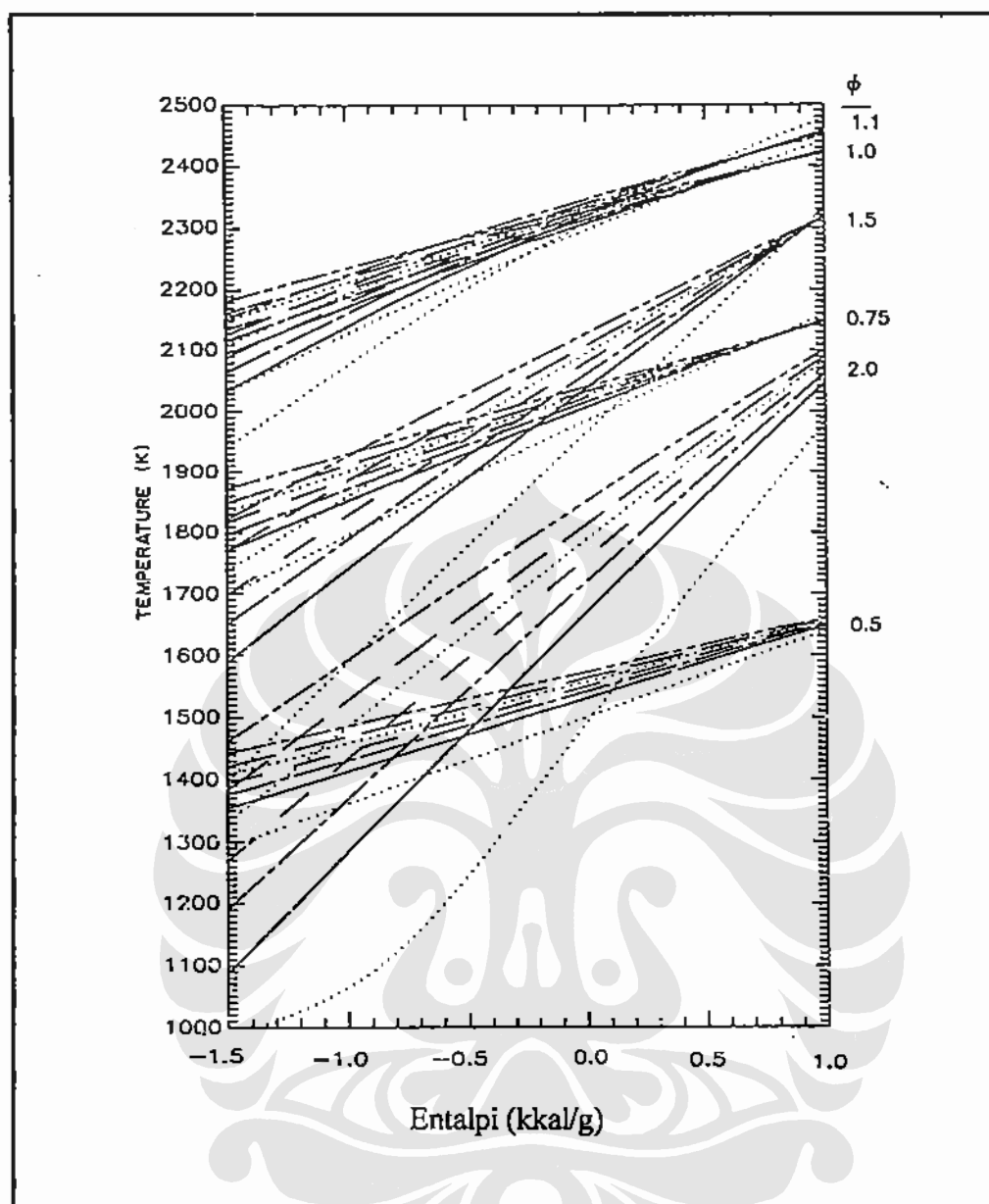


♦ Oksidasi parsial



♦ Oksidasi total dan parsial





Gambar 2.2 Temperatur *flame* (°K) dari hidrokarbon dan udara sebagai fungsi kandungan entalpi total reaksi (kcal/gr) untuk berbagai rasio relatif dan H/C pada 1 atm. Reference pada 298°C (Irvin G., 1996)

Keterangan:

- $H/C = 4$
- $H/C = 3$
- $H/C = 2.5$
- — — $H/C = 2.0$
- . - $H/C = 1.5$
- $H/C = 1.0$
- $H/C = 0$

Proses pembakaran pada kompor gas (LPG) yang dilakukan dalam penelitian ini termasuk ke dalam katagori pembakaran gabungan antara *premixed* dan *unpremixed* sehingga disebut *semi premixed* (Widodo et al, 2000).

II.1.2. Nyala Pembakaran

Nyala merupakan suatu gelombang panas yang terjadi karena reaksi kimia eksotermik yang cepat. Titik infleksi yang terletak antara daerah *preheating* dan daerah reaksi disebut sebagai titik suhu penyalan. Temperatur maksimum yang dapat dicapai suatu nyala hasil pembakaran bahan bakar dengan oksidator disebut dengan temperatur nyala. Bila suatu reaksi pembakaran mencapai temperatur maksimum dengan asumsi semua panas reaksi yang dilepas digunakan untuk memanaskan produk reaksi, maka temperatur nyalanya disebut dengan temperatur nyala adiabatik. Temperatur maksimum dapat dicapai jika bahan bakar dan oksigen tercampur dengan sangat baik, reaksi sempurna dan stoikiometrik.

Daerah nyala terbagi atas 3 yaitu :

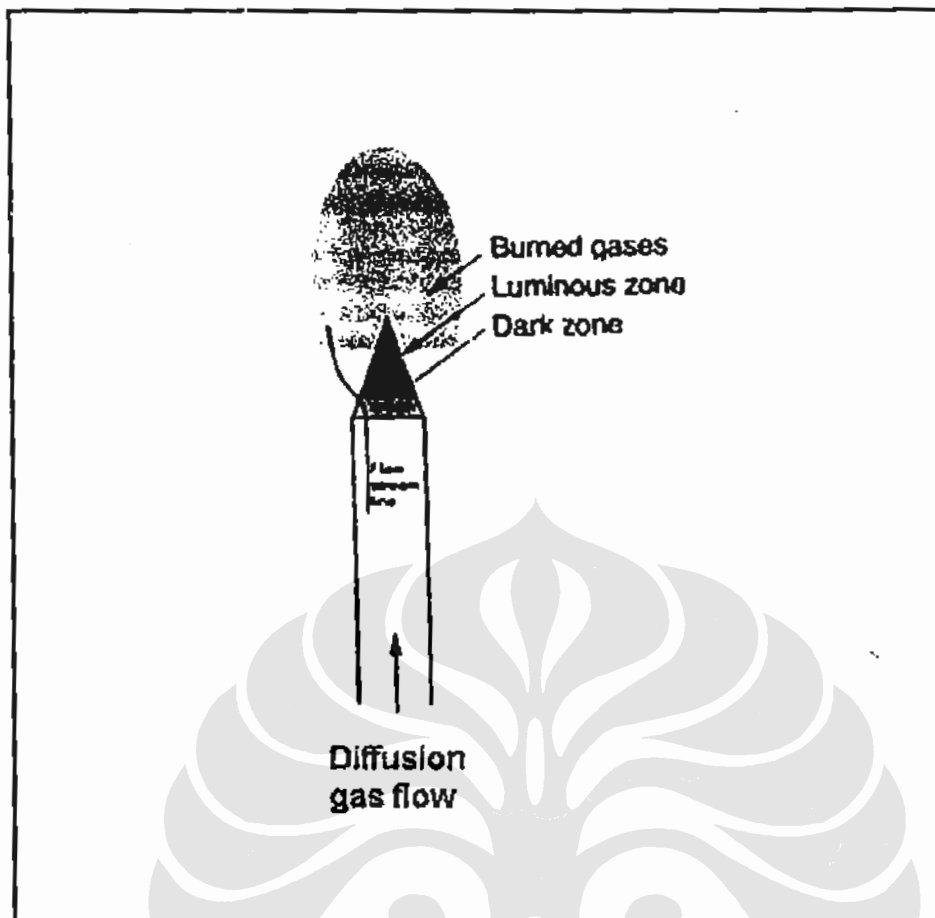
1. *Dark Zone*, yaitu daerah sebelum terjadi reaksi.
2. *Luminous zone*, yaitu daerah reaksi yang bertemperatur paling tinggi. Warna pada daerah *luminous* akan berubah dengan berubahnya rasio A/F, jika campuran *fuel lean* maka daerah ini akan berwarna violet akibat pancaran radikal HC, dan bila *fuel rich* maka daerah ini akan berwarna hijau akibat pancaran molekul C_2 .
3. *Non Luminous zone / Burned gas zone*, yaitu daerah reaksi tempat pembakaran gas lainnya. Temperatur tinggi di daerah *burned gasses* akan menimbulkan warna kemerahan akibat radiasi CO_2 dan uap air, jika bahan bakar berlebih maka daerah ini akan berwarna kuning akibat pancaran partikel karbon.

Pembagian dari ketiga nyala tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam kestabilan nyala diantaranya adalah (Vandever et.al, 1965), (Irvin G., 1996) :

- ♦ Batas nyala (*flammability limit*) adalah batas terendah dan tertinggi dari konsentrasi bahan bakar dan udara agar dapat terbakar pada tekanan dan temperatur tertentu.

Faktor utama yang menentukan *Flammability limit* adalah kompetisi antara laju pembentukan panas yang dikontrol oleh laju reaksi dan panas reaksi untuk rasio relatif (λ) tertentu, dan laju eksternal kehilangan panas ke lingkungan.



Gambar 2.3 Karakteristik nyala pada Bunsen (Irvin G., 1996)

Tabel 2.2 *Flammability limit* beberapa bahan bakar dalam udara dan oksigen^a
(Irvin G. 1996)

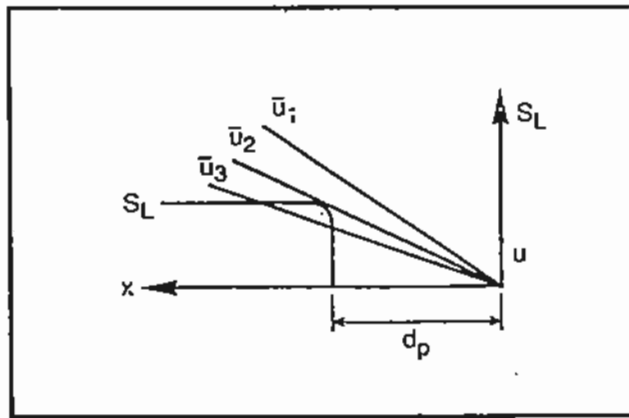
	<i>Lean</i>		<i>Rich</i>	
	Udara	Oksigen	Udara	Oksigen
H ₂	4	4	75	94
CO	12	16	74	94
NH ₃	15	15	28	79
CH ₄	5	5	15	61
C ₃ H ₈	2	2	10	55

^a persen volum bahan bakar

Tabel 2.2 memperlihatkan *flammability limit* dalam udara dan oksigen untuk beberapa bahan bakar. Pada sistem *lean*, baik untuk pembakaran dalam udara maupun dalam oksigen mempunyai nilai limit gas sama, sedangkan untuk sistem *rich*, semua *flammable gases* jauh lebih besar untuk pembakaran dalam oksigen dari pada dalam udara, hal ini karena tidak adanya nitrogen yang dapat bertindak sebagai *diluent*. Karena itu kisaran *flammability* selalu lebih besar untuk pembakaran dengan oksigen, seperti diperlihatkan pada Tabel 2.2.

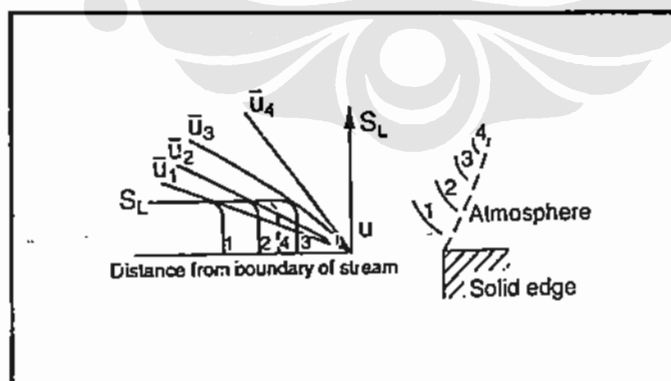
Adanya inert *diluent* seperti gas CO_2 , N_2 atau Ar akan mempengaruhi *flammability limit* (Irvin G., 1996). Karena gas gas inert tersebut akan menggantikan bagian oksigen yang terdapat dalam campuran. Gambar 2.3. menyajikan inert gas yang menjadi *diluent* dalam campuran bahan bakar-udara, terlihat bahwa pada kondisi *rich*, adanya inert *diluent* akan lebih sensitif dibandingkan pada sistem *lean*.

- ♦ Laju nyala disebut juga laju pembakaran, laju pembakaran normal atau laju *laminar flame*, atau lebih tepatnya didefinisikan sebagai kecepatan campuran bahan bakar – udara yang bergerak melalui gelombang pembakaran pada arah tegak lurus permukaan gelombang.
- ♦ *Flash back limit* adalah batas yang diperbolehkan laju nyala melebihi laju bahan bakar. Gambar 2.4 yaitu grafik laju nyala sebagai fungsi jarak untuk suatu gelombang nyala dalam tabung burner bunsen. Jarak dari dinding burner disebut jarak penetrasi d_p yaitu setengah dari diameter tabung. Jika $\bar{u}_1$ adalah laju rata-rata aliran gas dalam tabung di dekat dinding, pada laju lebih rendah $\bar{u}_2$, yang merupakan tangen dengan kurva S_L , diperoleh suatu titik stabil, maka $\bar{u}_2$ dikatakan sebagai laju minimum rata-rata sebelum terjadi *flash back*. Laju rata-rata $\bar{u}_3$ merupakan daerah dimana laju nyala lebih besar dari laju gas, pada saat ini terjadi yang dinamakan *flash back*.



Gambar 2.4 Profil laju gas dan laju pembakaran di dalam tabung burner bunsen (Irvin G., 1996)

- ♦ *Blows off limit* adalah batas kecepatan bahan bakar melebihi laju nyala. Ketika aliran gas dalam tabung meningkat, posisi kesetimbangan bergeser menjauh dari dinding tabung. Dengan bertambahnya jarak dari dinding, campuran gas *lean* mengalami pengenceran karena adanya interdifusi dari lingkungan, dan laju pembakaran pada *streamlines* paling luar akan menurun. Gambar 2.5 memperlihatkan ada 3 posisi nyala dimana $\bar{u}_3$ memiliki gradien laju sangat besar sehingga laju gas akan melebihi laju nyala, pada situasi ini gelombang pembakaran akan mengalami *blows off* sehingga $\bar{u}_3$ disebut dengan laju minimum sebelum terjadi *blows off*.



Gambar 2.5 Profil laju gas dan laju pembakaran di atas tabung burner bunsen (Irvin G., 1996)

II.1.3. Bahan Bakar

II.1.3.1. Bahan Bakar LPG

Gas LPG diperoleh dari hasil pengolahan gas alam minyak mentah (*crude oil*). Tipe dari gas LPG yang berasal dari gas alam dan minyak bumi umumnya sama. Kondensat gas yang telah dipisahkan dari etana dan metana pada titik didih rendah dan gasoline pada titik didih tinggi berisi sebagian besar hidrokarbon jenuh, yaitu, propane. Bagian yang lebih kecil adalah C4 jenuh, isobutana, dan n-butana. Rasio dari produk ini bervariasi bergantung dari kondensat.

Dalam pengolahan minyak mentah, sejumlah besar dari produk ringan hasil dari unit proses dapat dihasilkan menjadi produk LPG. Unit ini terdiri dari sistem fraksionasi, nafta reforming, *thermal/ catalytic cracking*. Hidrokarbon tidak jenuh yang ditemukan dalam LPG sebagian besar terdiri dari propilen dan butilen. Secara komersial, LPG yang dijual ke dalam negeri dan ke industri terbagi dalam empat tingkat, yaitu:

1. LPG propana yang sebagian besar terdiri dari propana dan propilen
2. LPG butana yang sebagian besar terdiri dari n-butana, isobutana dan butilen
3. LPG campuran yang terdiri dari sejumlah variabel dari semua C₃ dan C₄
4. LPG propana dengan kemurnian yang tinggi sekitar 95 %.

(Vandever et.al, 1965)

Sampai saat ini pemakaian bahan bakar gas sektor rumah tangga di Indonesia masih didominasi oleh LPG campuran, sehingga proses pembakaran pada penelitian ini akan menggunakan LPG campuran sebagai bahan bakar.

II.1.3.2. Komposisi Bahan bakar

Fraaksi (mol atau massa) senyawa A dalam fase liquid yang terdapat dalam bahan bakar dinyatakan dengan persamaan (Felder, 1986):

$$X_A = \frac{\text{mol senyawa A}}{\text{Total mol campuran}} \equiv \text{Fraksi mol A} \quad (2.3)$$

dan

$$M_A = \frac{\text{massa senyawa A}}{\text{Total massa campuran}} \equiv \text{Fraksi massa A} \quad (2.4)$$

Jika komposisi bahan bakar yang diketahui dalam satuan berat, maka harus dikonversi terlebih dahulu ke dalam satuan mol untuk perhitungannya. Konversi komposisi bahan bakar dari satuan berat ke satuan mol dapat dilakukan dengan persamaan:

$$X_i = \frac{M_f / W_i}{\sum M_f / W_i} \quad (2.5)$$

dimana W_i adalah berat molekul senyawa ke-i.

Pada penelitian ini, spesifikasi LPG cair (Pertamina) yang dipakai adalah : Propana 0,46 % (w/w) dan Butana 0,54 %.

II.1.3.3. Heating Value (HV)

Heating value atau nilai kalor dari suatu *combustible material* adalah negatif dari panas pembakaran standart, biasanya dinyatakan dalam per unit massa material. (Felder 1986). *Heating value* terdiri dari *High Heating Value* (HHV) dan *Low Heating Value* (LHV). HHV (nilai panas total atau *gross heating value*) adalah $-\Delta\hat{H}_c^\circ$ dengan $H_2O(l)$ sebagai produk pembakaran, dan LHV (*net heating value*) adalah $-\Delta\hat{H}_c^\circ$ dengan $H_2O(v)$ yang dihasilkan sebagai produk pembakaran. Karena $\Delta\hat{H}_c^\circ$ selalu negatif, maka *heating value* selalu positif.

Untuk menghitung LHV suatu bahan bakar dari HHV atau sebaliknya, harus dihitung dulu mol air yang dihasilkan ketika satu satuan massa bahan bakar dibakar. Jika mol air yang dihasilkan dinyatakan dengan n , maka :

$$HHV = LHV + n\Delta\hat{H}_v(H_2O, 25^\circ C) \quad (2.6)$$

sementara panas penguapan air pada $25^\circ C$ adalah

$$\Delta\hat{H}_v(H_2O, 25^\circ C) = 44 \text{ kJ/mol} \quad (2.7)$$

Jika bahan bakar terdiri dari campuran *combustible material*, *heating values* dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$HV = \sum y_i(HV)_i \quad (2.8)$$

(Felder, 1986)

dimana y_i adalah fraksi mol senyawa ke-i dalam fasa uap dan $(HV)_i$ adalah *heating values* senyawa ke-i. *Heating value* untuk beberapa bahan bakar padat liquid dan gas dapat dilihat pada Tabel 2.3, terlihat bahwa Hidrogen memiliki nilai kalor paling tinggi dan kayu memiliki nilai kalor paling rendah.

Fraaksi mol masing-masing komponen dalam fase uap (untuk dua komponen) dapat ditentukan dengan hukum Raoult's, yaitu (Van Ness, 1987) :

$$y_A = x_A p_A^{sat} / P \quad (2.9)$$

x_A adalah fraksi mol senyawa A dalam fasa cair dan p_A^{sat} adalah tekanan uap jenuh senyawa A. p_A^{sat} dapat ditentukan dengan persamaan Antoine sebagai berikut

$$p^{sat} = \exp\left(A - \frac{B}{C + T}\right) \text{kPa} \quad (2.10)$$

Tabel 2.3 Nilai kalor untuk beberapa bahan bakar

Bahan Bakar	Nilai kalor kJ/kg	Keterangan	Reff.
<i>Soft Wood</i>	23210	HHV	Felder, 1986
<i>Hard Wood</i>	34816	HHV	Felder, 1986
LPG	45837	LHV	EPA, 2000
Gas Alam (NG)	53385	HHV	Felder, 1986
Hidrogen	141586	HHV	Felder, 1986

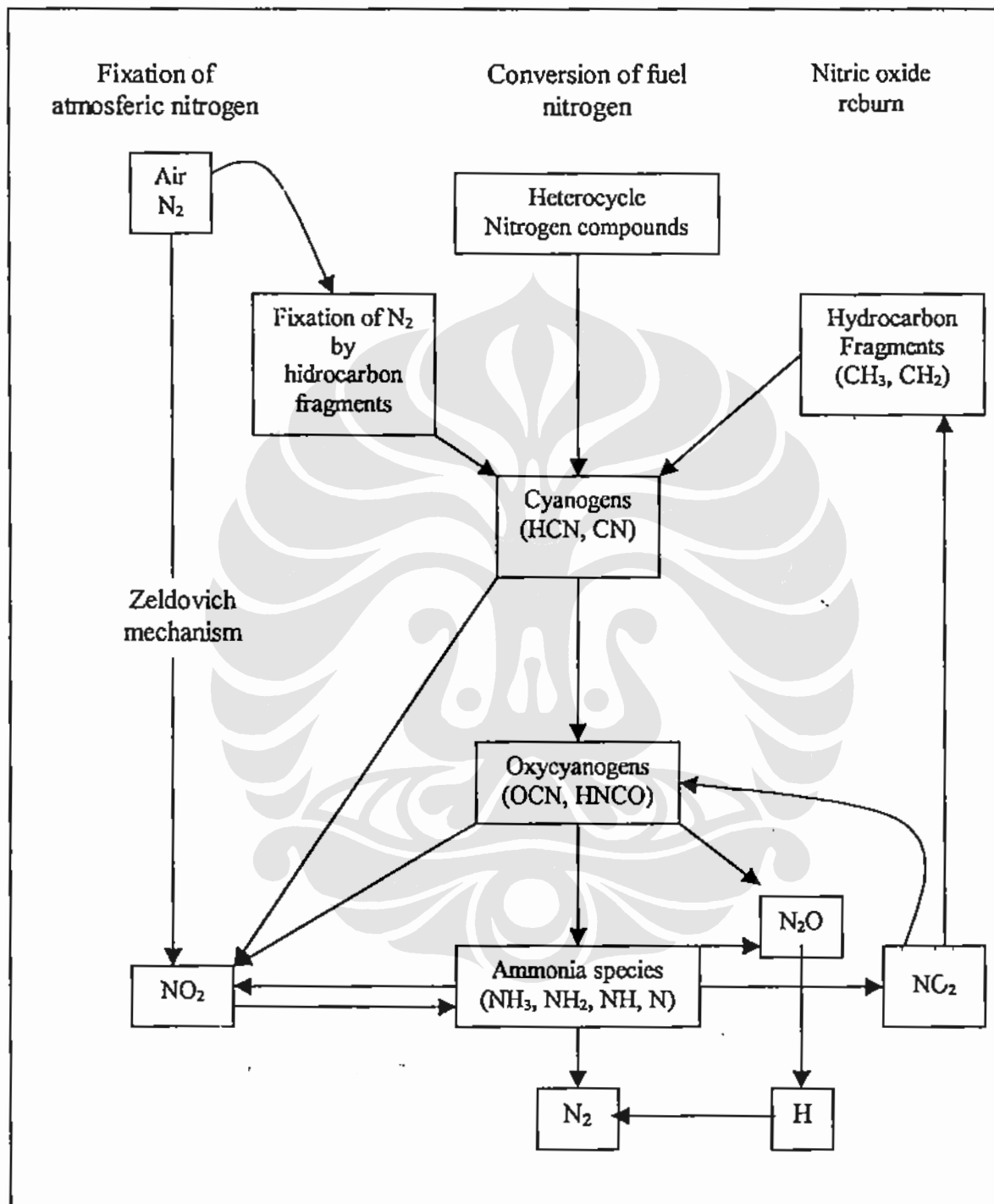
II.1.4. Emisi Pembakaran

Emisi yang dihasilkan oleh kompor kompor rumah tangga, meskipun secara individu sedikit, kalau dipandang secara global menjadi banyak dan potensial dalam menyumbang *greenhouse gas* (GHG), khususnya di banyak negara berkembang dimana rumah tangga umumnya menggunakan kompor dengan efisiensi pembakaran yang rendah, karena itu menghasilkan gas gas polutan sebagai akibat dari pembakaran yang tidak sempurna tersebut seperti: karbon monoksida (CO), metana (CH₄), *total non-methane organic compounds* (TNMOC), SO_x, NO_x, dan H₂S (EPA, 2000). Selain persoalan GHG, beberapa gas emisi tersebut merupakan polutan yang jika terdapat berlebihan di udara akan mengganggu pertumbuhan tumbuh-tumbuhan, hewan dan mempengaruhi kesehatan manusia.

♦ Nitrogen Oksida (NO_x).

Nitrogen oksida dihasilkan oleh sumber-sumber pembakaran yang dominan dalam membentuk NO sedangkan sisanya yang biasanya kurang dari 5 % , membentuk

nitrogen dioxide (NO_2). Kemampuan tungku katalitik untuk melangsungkan pembakaran sempurna pada konsentrasi bahan bakar rendah (*lean*) memungkinkan untuk beroperasi pada temperatur dimana pembentukan NO_x dapat diminimalkan.



Gambar 2.6 Jalur Pembentukan nitrogen oksida dalam pembakaran. (Copper, 1990)

Pembentukan NO_x terjadi terutama melalui mekanisme *Zeldovich thermal*. Menurut mekanisme ini, oksidasi N_2 dinyatakan dengan tahap sebagai berikut:



Mekanisme lain yang mungkin dalam menghasilkan NO_x dikenal dengan *prompt NO*, hanya dijumpai dalam *rich hydrocarbon flames*. (<http://www.catalyticsys.com/catburner%20.htm>).

Komponen utama dari NO_x yaitu nitrogen oksida (NO) dapat dikonversikan lagi menjadi nitrogen dioksida (NO_2) dan nitrohen tetraoksida (N_2O_4). Pada Gambar 2.6 dapat dilihat jalur pembentukan nitrogen oksida yang dihasilkan dari proses pembakaran (Copper, 1990).

NO_x dapat menyebabkan terjadinya asap di udara, hal ini dapat mengganggu pertumbuhan tanaman dan hewan, dan dapat mempengaruhi kesehatan manusia. Selanjutnya, NO_x bereaksi dengan VOCs reaktif membentuk *photochemical oxidants* dengan bantuan sinar matahari. Disamping itu, NO_x juga dapat menyebabkan terjadinya hujan asam (Copper, 1990).

Tanaman berdaun lebar akan menjadi layu pada konsentrasi NO_x 2 sampai 10 ppm, dan terhenti pertumbuhannya pada konsentrasi kira-kira 0.5 ppm (Brandt and Heck, 1986). Efek NO_x pada manusia adalah iritasi mata dan hidung, *pulmonary edema (swelling)*, *bronchitis*, dan *pneumonia*. Ini dapat terjadi pada kisaran konsentrasi NO_x 10 – 30 ppm.

♦ Karbon Monoksida (CO)

Seperti dikatakan di atas, untuk mereduksi emisi NO_x kompor konvensional beroperasi dengan campuran *rich fuel-air*, sehingga temperatur pembakaran menjadi lebih rendah yang merupakan kondisi dimana NO_x tidak akan terbentuk tetapi secara simultan kondisi ini menyebabkan stabilitas pembakaran terganggu. Sementara Turn (1996) dalam bukunya menyebutkan, sumber terbentuknya CO adalah daerah *rich* (kekurangan udara) karena tidak mendukung terjadinya pembakaran cepat sehingga pembakaran cenderung menjadi tidak sempurna dengan reaksi



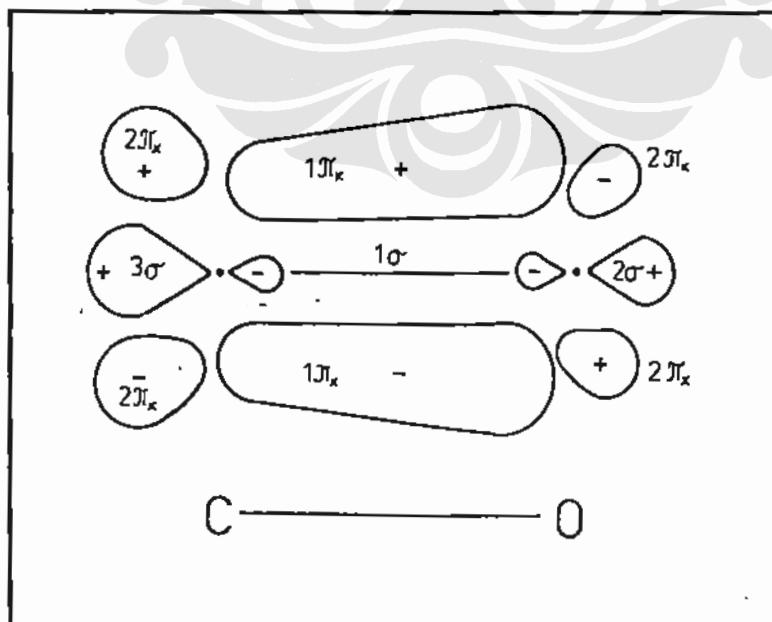
Akan semakin berpeluang dan reaksi



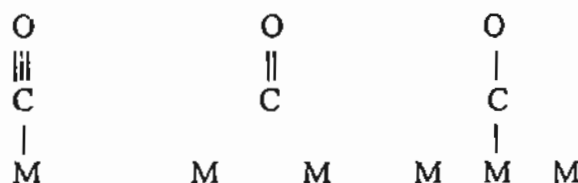
akan semakin menurun. Sehingga emisi gas CO meningkat. Maka biasanya tungku konvensional selalu menghadapi suatu *tradeoff* antara emisi CO dan NO_x (<http://www.catalyticsys.com/catal%20comb.htm>).

Oksidasi katalitik CO merupakan salah satu kajian yang sangat menarik dalam reaksi katalitik (Bielanski and Haber, 1991). Terdapat dua kelompok katalis yang biasanya digunakan untuk oksidasi CO, yaitu: kelompok logam platinum dan oksida logam transisi. Menurut Bielanski dan Haber (1991), orbital yang paling kuat berkontribusi pada pembentukan ikatan C dan O adalah orbital 1σ , yang menurut Gambar 2.7 disimbolkan dengan garis lurus. Orbital ini memiliki densitas elektron tertinggi yang terletak diantara kedua inti C dan O. Dua orbital lainnya yaitu 2σ dan 3σ , terletak disepanjang sumbu C—O di luar molekul dan menyumbangkan pasangan elektron sunyi.

Bielanski (1991), dalam bukunya menuliskan bahwa menurut Little (1966), dengan adanya katalis (dalam hal ini atom logam transisi), molekul CO akan berikatan dalam bentuk karbonil secara linier, membentuk jembatan dengan dua atom logam atau membentuk jembatan dengan 3 atom logam seperti pada Gambar 2.8. (M = atom logam).



Gambar 2.7 Bentuk orbital-orbital pada molekul CO (Bielanski, 1991)



Gambar 2.8 Skema ikatan CO dengan atom logam (Bielanski, 1991)

Pada ketiga kasus, atom karbon secara langsung berikatan dengan atom logam. Ikatan linier akan menutupi sebagian orbital 3σ dari molekul CO dengan orbital σ yang kosong dari atom logam, yaitu orbital d_z^2 dimana secara simultan terjadi *back donation* elektron dari orbital $d\pi$ yang penuh (yaitu d_{xz} dan d_{yz}) ke orbital-orbital antibonding $2\pi_y$ dan $2\pi_x$ yang kosong. *Back donation* ini berkontribusi memperkuat ikatan M—C. Pergeseran densitas elektron ke orbital-orbital antibonding 2π akan melemahkan ikatan C—O dalam molekul karbonmonoksida dengan menurunkan frekuensi ikatan dari 2143 untuk molekul CO menjadi 2100 – 2000.

Karbon monoksida pada dasarnya inert terhadap tumbuh-tumbuhan tetapi dapat memberikan efek negatif yang signifikan terhadap kesehatan manusia. CO adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa yang dapat bereaksi dengan haemoglobin dalam darah sehingga menghalangi transfer oksigen ke dalam tubuh manusia. Tergantung pada konsentrasi dan lama terkenanya, efek terhadap manusia berkisar dari sakit kepala ringan sampai mabuk berat hingga meninggal (Cooper, 1990).

Efek beracun CO terhadap manusia semata-mata hanya pada interaksi CO dengan haemoglobin darah (Stokinger dan Coffin, 1968). Ketika campuran udara dan CO masuk melalui pernapasan, baik oksigen maupun CO ditransfer melalui paru-paru ke dalam darah. Keduanya menyerap hemoglobin, hanya saja koefisien kesetimbangan CO kira-kira 210 kali lebih besar dari pada oksigen. Sehingga, rasio kesetimbangan karboksihaemoglobin (HbCO) terhadap oksihemoglobin (HbO₂) dinyatakan dengan persamaan :

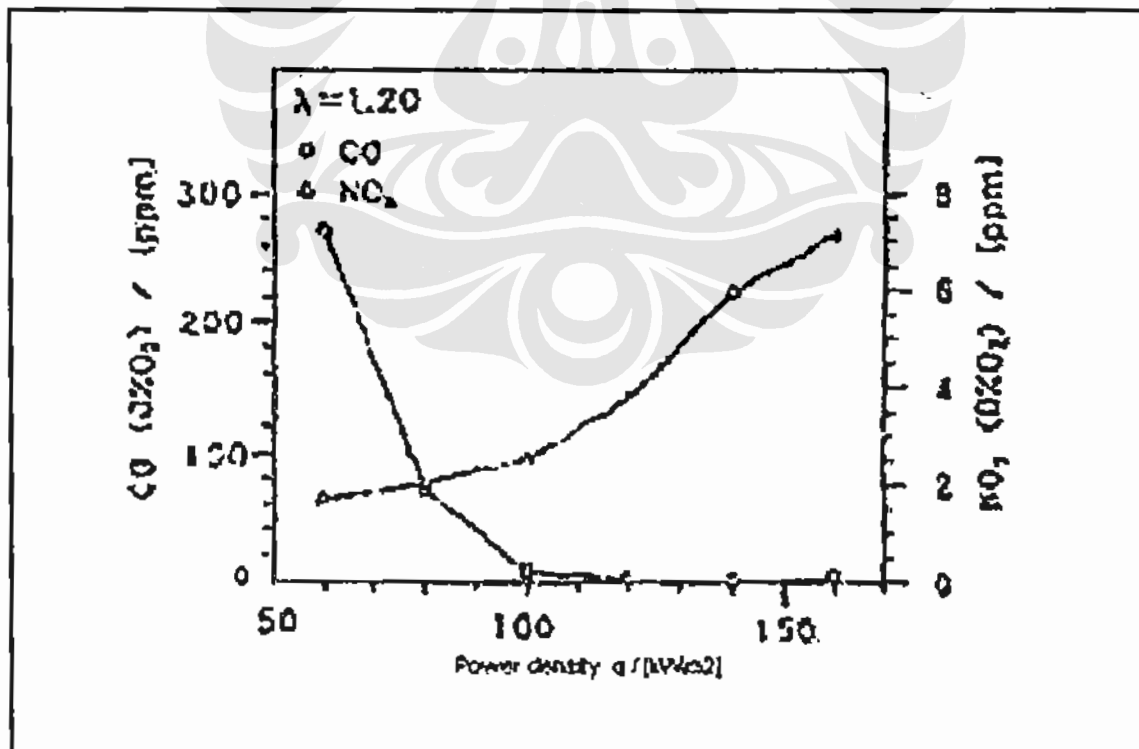
$$\frac{HbCO}{HbO_2} = (210) \frac{\bar{P}_{CO}}{\bar{P}_{O_2}} \quad (2.11)$$

dimana $\bar{P}_{CO}$, $\bar{P}_{O_2}$ adalah tekanan parsial CO dan O_2 berturut-turut.

Seandainya CO yang terhisap lebih banyak maka HbCO yang dibentuk akan menjadi lebih banyak pula sehingga HbO₂ dalam darah juga akan menurun.

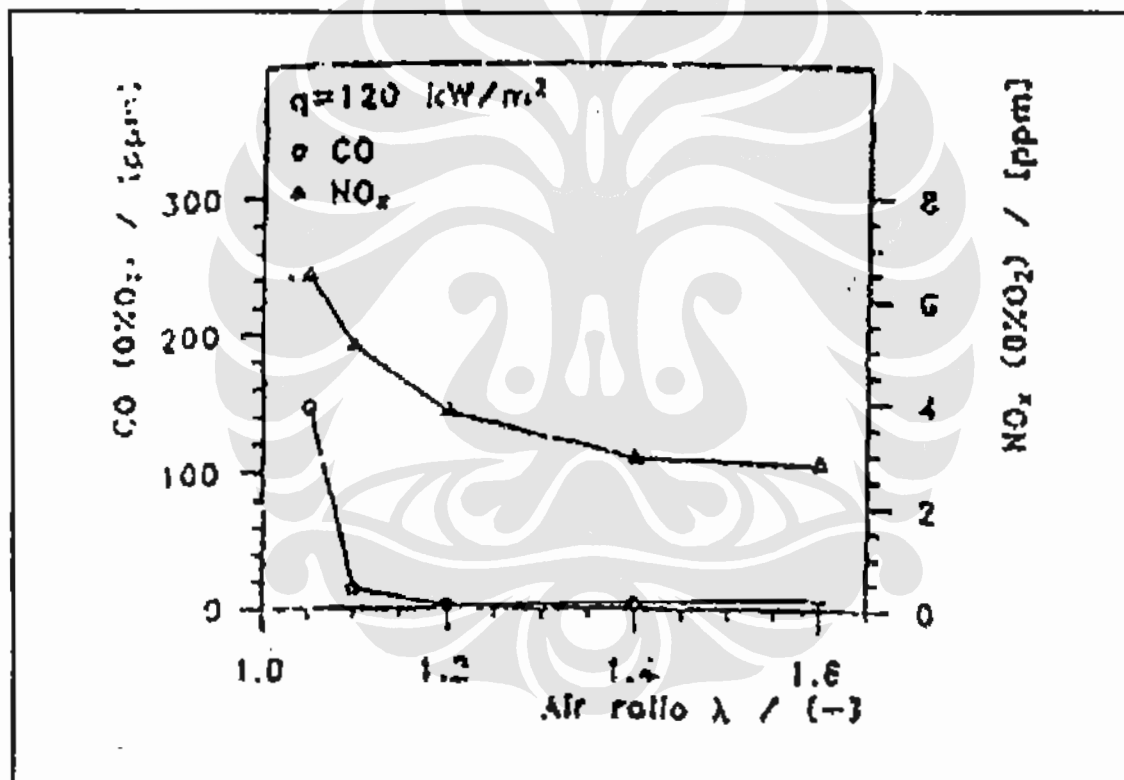
Dengan menghisap CO yang sama, bagi penderita anemia dan paru-paru kronis lebih berisiko kekurangan oksigen dibandingkan dengan yang lain. Level HbCO dalam darah serendah 2 % sampai 5 % telah memperlihatkan adanya pengaruh.

Power density atau kapasitas spesifik pembakaran didefinisikan sebagai sejumlah kalor per satuan waktu (daya) yang dihasilkan suatu pembakaran terhadap luas nyala. Valiant (1999), telah melakukan studi untuk mengetahui hubungan antara *power density* dengan emisi metana tak terbakar pada temperatur tertentu. Berdasarkan hasil penelitiannya, *power density* berbanding lurus dengan konversi bahan bakar (metana) yang dapat dibuktikan dengan menurunnya jumlah emisi metana seiring dengan meningkatnya kapasitas spesifik yang ditunjukkan dengan meningkatnya temperatur. *Power density* yang dihasilkan dari penelitian ini sekitar 11000-16000 kW/m².



Gambar 2.9 Pengaruh *power density* pada emisi CO dan NO (Brockerhoff, 1997)

Penelitian lain yang dilakukan oleh Brockerhoff (1997) pada burner katalitik menggunakan platina sebagai inti aktif dengan coating platina sebanyak $0,7 \text{ g/m}^2$ pada permukaannya. Hasil yang didapat bisa dilihat pada Gambar 2.9 yang menunjukkan bahwa pada rasio udara bahan bakar tertentu ($\lambda = 1,2$) untuk kasus *low power density*, tidak terjadi pembakaran sempurna karena temperatur reaksi terlalu rendah. Ini cenderung meningkatkan konsentrasi CO sampai 300 ppm. Emisi CO mendekati nol pada power density di atas 100 KW/m^2 . Suatu efek yang berlawanan dapat diamati untuk emisi NO_x . NO_x meningkat dengan naiknya temperatur dari 1,5 ppm pada power density terendah menjadi 7 ppm pada power density 160 KW/m^2 .



Gambar 2.10 Pengaruh λ pada emisi CO dan NO (Brockerhoff, 1997)

Disamping itu, dilakukan juga penelitian untuk menentukan hubungan antara rasio udara dengan bahan bakar dengan emisi CO dan NO pada *power density* tertentu. Gambar 2.10 memperlihatkan emisi CO dan NO_x sebagai fungsi air ratio pada power density 120 KW/m^2 . Konsentrasi CO kira-kira 150 ppm pada kondisi mendekati stoikiometri, kemudian menurun dengan naiknya rasio udara, emisi CO minimum

dicapai pada rasio udara 1,2 dan kemudian meningkat lagi pada waktu tinggal yang singkat. Sementara emisi NO_x menurun dari kira-kira 6 ppm menjadi 3 ppm pada kisaran rasio udara yang sama.

♦ *Unburned Hydrocarbon (UHC)*

Hidrokarbon tidak terbakar adalah senyawa hidrokarbon yang dihasilkan dari proses pembakaran yang tidak sempurna (EPA, 2000). Reaksi pembakaran yang tidak sempurna ini bisa disebabkan oleh karena rendahnya rasio relatif bahan bakar-udara atau karena pencampuran udara dan bahan bakar yang tidak homogen, dan juga tidak tercukupinya waktu reaksi oksidasi sempurna. UHC merupakan komponen dari senyawa organik yang *volatile* yang berperan sebagai komponen dari proses terjadinya *photochemical smog* dan pembentukan ozon.

Menurut hasil penelitian yang dilakukan EPA (2000) untuk kompor gas LPG konvensional (tanpa katalis), emisi untuk gas CO_2 , CO, NO_x dan TNMOC berturut-turut adalah 1399, 17, 19, dan 14,7 ppmv seperti terlihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Konsentrasi (ppmv) emisi untuk kompor gas LPG konvensional (EPA, 2000)

Emisi	ppmv
CO_2	1399
CO	17
NO_x	11
UHC	15

II.1.5. Efisiensi Termal

Efisiensi termal adalah hasil dari efisiensi pembakaran dan efisiensi perpindahan panas. Efisiensi pembakaran mengukur berapa besar energi kimia yang terdapat dalam bahan bakar yang dikonversikan menjadi panas dan kemudian digunakan untuk menguapkan air di dalam teko. Efisiensi perpindahan panas menunjukkan berapa fraksi panas yang dihasilkan yang secara aktual dipindahkan ke dalam teko dan air. Efisiensi termal dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\eta_{\text{termal}} = Q_{\text{sistem}} / Q_{\text{fuel}} \quad (2.12)$$

Berdasarkan termodinamika, kalor yang diterima air dapat ditentukan dengan:

$$Q_{\text{air}} = W_{\text{air}} \cdot a \cdot \Delta T_{\text{air}} \quad (2.13)$$

dan kalor yang dihasilkan gas adalah:

$$Q_{\text{fuel}} = F_{\text{fuel}} \cdot L \cdot HV_{\text{fuel}} \quad (2.14)$$

sehingga rumus akhir untuk efisiensi termal dengan memperhatikan adanya penguapan air adalah: (Ahuja et al., 1987).

$$\eta(\%) = \frac{[W_i \cdot a \cdot (T_f - T_i) + (W_f - W_i) \cdot L]}{F \cdot L \cdot HV} \cdot 100 \quad (2.15)$$

- η = efisiensi (%)
- W_i = berat awal air (kg)
- a = panas spesifik air (kj/deg-kg)
- T_f = temperatur akhir ($^{\circ}\text{C}$)
- T_i = temperatur awal ($^{\circ}\text{C}$)
- W_f = berat akhir air (kg)
- L = panas laten penguapan air (kj/kg)
- F = laju bahan bakar (kg/jam)
- t = waktu pemasakan (jam)
- HV = nilai kalor bahan bakar (kj/kg)

Jika proses pemasakan tidak berlangsung sampai air di dalam teko mendidih melainkan hanya sampai tepat air akan menguap, maka persamaan di atas menjadi:

$$\eta(\%) = \frac{W_i \cdot a \cdot (T_f - T_i)}{F \cdot L \cdot HV} \cdot 100 \quad (2.16)$$

Tabel 2.5 memperlihatkan hasil uji power dan efisiensi yang dilakukan oleh EPA(2000). Power yang dimaksudkan di sini adalah laju energi yang digunakan selama pembakaran. Power (kW) dapat dihitung dengan persamaan (EPA, 2000):

$$\text{Power (kW)} = \frac{F \cdot H_w}{3600} \quad (2.17)$$

F = Laju pembakaran (kg/jam)

H_w = Nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

Tabel 2.5 Power input dan efisiensi termal untuk bahan bakar gas dan liquid

Bahan Bakar	Power kW	Efisiensi %
LPG	1,6 ± 0,1	53,6 ± 2,2
Biogas	1,4 ± 0,1	57,3 ± 0,5
Kerosene/wick	1,3 ± 0,1	50,0 ± 6,7
Kerosene/pressure	1,7 ± 0,1	47,0 ± 2,2

Efisiensi termal kompor biogas (57,3 %) adalah yang tertinggi diantara semua kompor yang diuji. Efisiensi termal untuk kompor LPG 53,6 % adalah lebih kecil dari spesifikasi BIS 60% (BIS, 1984).

IL.1.6 Faktor Faktor Emisi

Perhitungan emisi terdiri dari dua metode, yang pertama disebut dengan *instant emissions*, digunakan untuk menentukan konsentrasi emisi lokal. Sedangkan yang kedua adalah *ultimate emissions*, digunakan untuk menentukan emisi GHG (*Green House Gas*) dari bahan bakar. Yang termasuk dalam GHG adalah CO₂, CH₄, N₂O yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil dan HFCs, PFCs dan SF₆ yang dihasilkan dari aktivitas-aktivitas lainnya. (www.epa.gov). Pada tulisan ini hanya akan dibahas mengenai *instant emissions*.

Metode *carbon balance* (Smith et al, 1992; 1993) akan digunakan untuk menentukan faktor-faktor emisi. Selama pembakaran, bahan bakar hidrokarbon (FC) terutama dikonversi menjadi gas karbondioksida (CO₂), karbonmonoksida (CO), metana (CH₄) dan *Total Non Methan Organic Compound* (TNMOC).

Dengan basis karbon

$$FC = CO + CH_4 + TNMOC + CO_2 \quad (2.18)$$

FC = Fuel yang dikonsumsi x fraksi karbon

$$CO_2 = FC - (CO + CH_4 + TNMOC) \quad (2.19)$$

Dibagi dengan CO_2 , maka

$$1 = FC / CO_2 - (CO + CH_4 + TNMOC) / CO_2 \quad (2.20)$$

atau

$$1 = FC / CO_2 - K \quad (2.21)$$

K = rasio jumlah emisi terhadap $CO_2 = (CO + CH_4 + TNMOC) / CO_2$

Faktor-faktor emisi per siklus eksperimen = EF_{bc} (g/burncycle).

$$CO_2 \text{ as g carbon} = FC / (1+K) \quad (2.22)$$

$$CO \text{ as g carbon} = (\text{rasio emisi untuk CO}) \times CO_2 \text{ as carbon} \quad (2.23)$$

$$CH_4 \text{ as g carbon} = (\text{rasio emisi untuk CH}_4) \times CO_2 \text{ as carbon} \quad (2.24)$$

$$TNMOC \text{ as g carbon} = (\text{rasio emisi untuk TNMOC}) \times CO_2 \text{ as carbon} \quad (2.25)$$

(diasumsikan di sini berat molekul equivalen untuk TNMOC adalah 18 per atom karbon)

Faktor emisi per unit bahan bakar = EF_m

$$EF_m = (EF_{bc}) / \text{massa bahan bakar yang digunakan pada eksperimen; g/kg fuel} \quad (2.26)$$

Faktor emisi per unit kandungan energi bahan bakar (g/MJ)

$$EF_e = EF_m / (\text{energy content of fuel (MJ/kg)}) \quad (2.27)$$

Faktor emisi per unit energi yang ditransfer (g/MJ_d)

$$EF_t = EF_e / \eta \quad (2.28)$$

Dengan η adalah efisiensi termal kompor pada persamaan (2.15) dan (2.16)

Tabel 2.6 memperlihatkan faktor-faktor hasil penelitian yang dilakukan EPA (2000) dibandingkan dengan hasil penelitian Smith et al (1992) untuk bahan bakar LPG. Diperlihatkan bahwa faktor emisi CO_2 , CO dan CH_4 hampir sama dengan faktor emisi untuk yang dijumpai di Manila, tetapi faktor emisi TNMOC yang dilaporkan EPA (2000) jauh lebih besar dibandingkan dengan yang dilaporkan di Manila. Disamping itu, pada Table 2.6 juga diperlihatkan emisi GHG untuk berbagai bahan bakar di India (1990-1991).

Tabel 2.6 Faktor-faktor emisi (g/kg) dan emisi GHG (Tg/th) untuk bahan bakar LPG

Penelitian	Faktor Emisi (g/kg)				
	CO ₂	CO	CH ₄	TNMOC	NO _x
India (EPA, 2000)	3085	15	0,05	18,8	0,15
Manila (Smith et al, 1992)	3110	24	0,04	3	0,03
Emisi GHG di India (EPA, 2000), (Tg/th)	6,48	0,0315	0,0001	0,0395	0,0003

IL2. PEMBAKARAN KATALITIK

Konsep pembakaran katalitik dilatarbelakangi oleh semakin ketatnya standar emisi hasil pembakaran bahan bakar fosil di masa mendatang (Brockerhoff, 1997). Pembakaran katalitik merupakan teknik yang efektif untuk mencapai pembakaran yang bersih (Ismagilov, 1999). Dengan pembakaran katalitik, emisi NO_x (NO + NO₂) dan CO dapat direduksi sehingga tingkat emisi yang dihasilkan bisa dua sampai tiga kali lebih rendah jika dibandingkan dengan proses pembakaran konvensional (<http://www.catalyticsys.com/catburner%20.htm>). Hal ini dimungkinkan karena pada proses pembakaran katalitik, energi aktivasi suatu reaksi secara termodinamika mempunyai kemungkinan diturunkan dengan adanya interaksi permukaan padatan aktif dengan gas reaksi (Brockerhoff, 1997). Teknologi ini dapat diaplikasikan untuk gas turbin dan boiler dari skala industri sampai skala yang lebih kecil, sistem pemanas untuk rumah tangga dan kompor.

Dua manfaat utama yang diperoleh dengan pembakaran katalitik dalam hal *flame burners* yaitu (<http://www.catalyticsys.com/catal%20comb.htm>):

- ◆ Proses oksidasi dapat berlangsung pada temperatur dan konsentrasi bahan bakar yang relatif rendah.
- ◆ Temperatur dan konsentrasi yang rendah ini memungkinkan untuk mencapai tingkat emisi NO_x yang lebih rendah dibandingkan dengan burner konvensional.

Peran serta katalis di sini adalah menurunkan energi aktivasi reaksi pembakaran sehingga temperatur pembakaran menjadi lebih rendah yang akan dapat menghindari

terbentuknya NO_x dan dapat mengoksidasi lanjut hidrokarbon dan CO menjadi CO_2 dan air. Di dalam tungku yang membakar bahan bakar hidrokarbon ringan (Seperti metana atau propana), energi aktivasi untuk reaksi oksidasi homogen kira-kira 30-50 kcal/mol, sementara untuk oksidasi heterogen kira-kira 10-20 kcal/mol. Konsekuensinya, temperatur dan konsentrasi bahan bakar menjadi lebih rendah dibandingkan oksidasi homogen. Karena itu dan juga karena kelembaman termal yang besar dari support katalis, pembakaran katalitik dapat tetap stabil pada konsentrasi bahan bakar yang jauh di bawah konsentrasi bahan bakar untuk pembakaran konvensional yang mungkin (<http://www.catalytic.com/%20comb.htm>).

IL3. KATALIS OKSIDASI

Katalis adalah suatu zat yang dapat meningkatkan laju reaksi kimia hingga mendekati kesetimbangan tanpa dirinya sendiri terlibat secara permanen dalam reaksi tersebut. (Richardson, 1989). Meskipun beberapa material katalis merupakan zat tunggal, umumnya katalis tersusun atas tiga komponen yaitu:

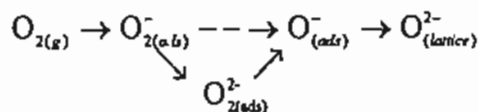
- Inti aktif yang berfungsi mempercepat dan mengarahkan reaksi sehingga reaktan terkonversi dan pembentukan produk selektif
- Penyangga/support yang berfungsi sebagai tempat penyebaran inti aktif dan bertujuan untuk memperluas kontak antara reaktan dengan inti aktif tanpa mengurangi aktifitas inti aktif itu sendiri.
- Promotor yang berfungsi untuk meningkatkan kinerja katalis sehingga umumnya bersifat tidak aktif tetapi dapat memperbaiki kinerja katalis.

Berikut ini beberapa point yang harus dipertimbangkan dalam memilih material aktif katalis pembakaran (Zwiukel, 1999):

- Tidak meningkatkan laju sintering material support
- Dispersinya pada support stabil
- Tidak bereaksi dengan support hingga membentuk fasa lain yang tidak aktif
- Mempunyai tekanan uap yang cukup rendah pada kondisi operasi.

Hampir semua logam unsur transisi (*d*-metals) seperti Co, Ni, Cu, Cr, Fe dll mempunyai aktivitas yang tinggi sebagai katalis oksidasi, hal ini karena kebanyakan dari unsur-unsur transisi mempunyai orbital *d* yang masih kosong sehingga dapat mengemisip oksigen menjadi spesi oksigen teradsorpsi dalam katalis yang mempunyai daya oksidasi yang hebat. (Richardson, 1989).

Menurut Bielanski dan Haber (1991), katalis oksidasi yang paling penting adalah oksida-oksida dari logam-logam transisi. Sama halnya dengan katalis unsur transisi, katalis oksida logam transisi juga memiliki kemampuan mengkemisorps oksigen. Oksigen yang teradsorpsi pada permukaan suatu oksida logam, keberadaannya dapat berupa molekul atau atom, netral atau bermuatan menurut tahapan sebagai berikut :



Diasumsikan selama proses adsorpsi, oksigen dapat menerima elektron satu demi satu hingga mencapai bentuk tereduksi totalnya (O^{2-}) yang sedikit berbeda dari bentuk ion oksigen *lattice*. Berdasarkan asumsi-asumsi, radikal oksigen terbentuk pada oksida logam tereduksi dan hanya stabil pada temperatur rendah. Hal ini sangat jauh dari kondisi reaksi oksidasi yang biasanya terjadi pada temperatur di atas 300°C . Sehingga beberapa peneliti menyatakan bahwa atom oksigen netral berperan sebagai spesi aktif dalam reaksi oksidasi. Studi hubungan antara sifat katalitik dengan energi ikatan oksigen permukaan telah banyak dilakukan. Dari hasil penelitian mengenai hubungan panas disosiasi O_2 yang teradsorpsi $q(\text{O}_2)$ dengan laju oksidasi berbagai molekul (H_2 , CH_4 , C_2H_6 dan lain-lain) yang membentuk produk H_2O dan CO_2 , disimpulkan bahwa laju oksidasi meningkat dengan menurunnya $q(\text{O}_2)$. Menurut Germain (1972), tingkat aktivitas oksida-oksida unsur transisi untuk mengoksidasi katalitik hidrogen dan karbon monoksida adalah sebagai berikut:

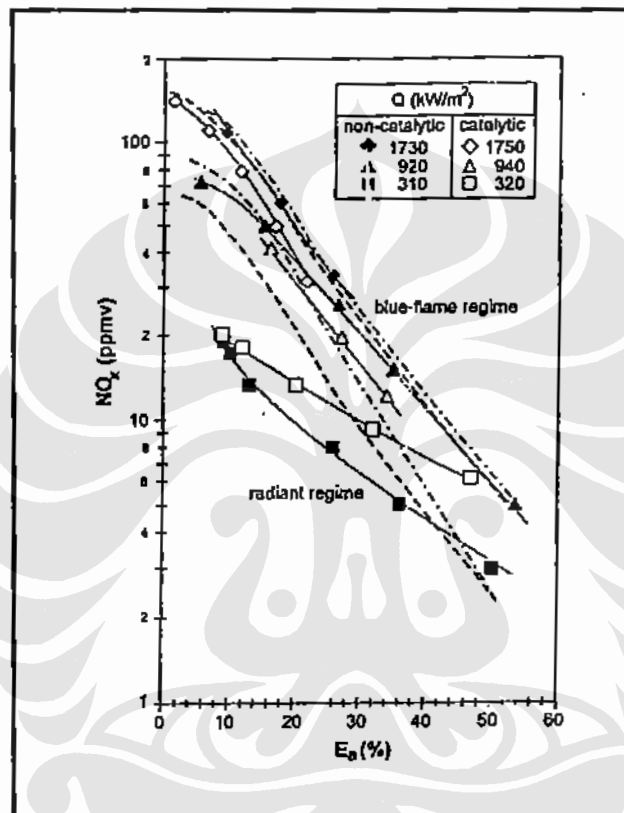


Hasil yang sama juga dijumpai untuk oksidasi total CH_3OH , C_3H_6 , C_6H_6 . (Bielanski and Haber, 1991).

Harga katalis logam mulia yang tinggi telah mendorong para peneliti untuk mengganti logam mulia tersebut (yang memperlihatkan aktivitas pembakaran yang tinggi pada temperatur rendah) dengan katalis logam non-mulia, khususnya oksida-oksida tipe perovskite ABO_3 (dimana A = *rare earth* dan B = logam transisi seperti Cr, Mn, Fe, Co, Ni dan lain-lain) dengan atau tanpa substitusi parsial A dengan elemen lain seperti Sr. Kajian yang telah dilakukan oleh Chaouki et al (1993, 1994) memperlihatkan bahwa LaCoO_3 dengan substitusi La oleh Sr dan Co oleh Fe atau Ni telah memperlihatkan aktivitas pembakaran metana yang tinggi (Choudhary, 1999). Sedangkan menurut H Arai (1986, 1996) katalis tipe perovskite memiliki stabilitas fisika, kimia dan termal yang bagus pada suhu di atas 1100°C , selain itu juga tahan terhadap racun sebagai efek adanya senyawa

sulphur yang terdapat di dalam bahan bakar (I. Cerri et al, 2000). Menurut U.S Patent 5,939,354, diketahui bahwa material-material tipe perovskite sangat baik untuk reaksi oksidasi dan reduksi katalitik sehubungan dengan kontrol terhadap emisi gas buang kendaraan.

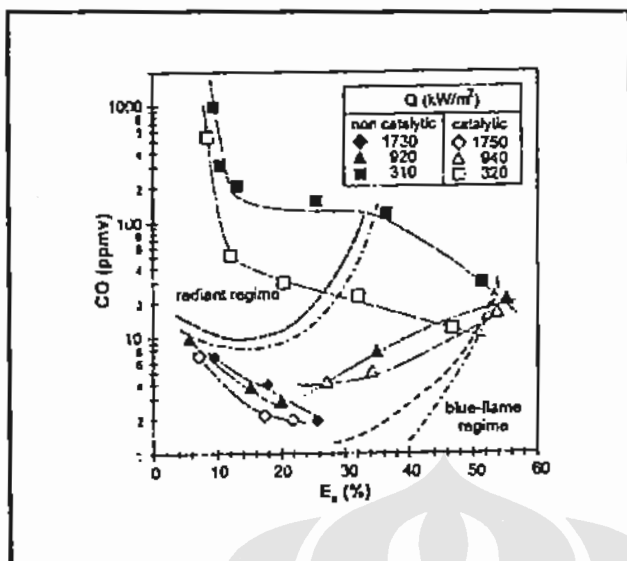
Hasil penelitian yang dilakukan oleh I Cerri et al (2000) menggunakan katalis tipe perovskite LaMnO_3 yang terdispersi di atas permukaan berpori *FeCrAlloy burner* untuk pembakaran gas metana memperlihatkan adanya reduksi emisi NO_x , CO dan UHC yang



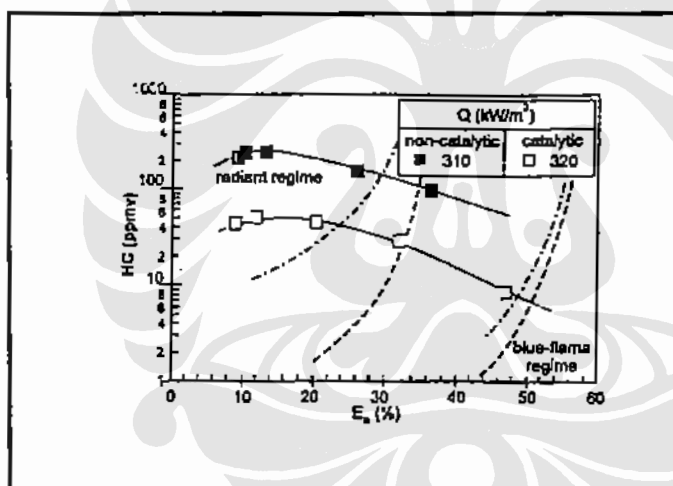
Gambar 2.11 Emisi NO_x sebagai fungsi E_a untuk beberapa nilai Q (I Cerri et al, 2000)

signifikan dibandingkan dengan *burner* konvensional untuk tiga nilai *heat power* (Q). Pada Gambar 2.11 terlihat bahwa konsentrasi NO_x dapat dipertahankan di bawah 70 ppmv (untuk konvensional lebih besar dari 100 ppm) ketika beroperasi pada *excess air* (E_a) berkisar antara 15-25 %.

Sementara itu untuk kisaran E_a yang sama, konsentrasi CO untuk *catalytic burner* di bawah 30 – 40 ppm, sementara untuk *non-catalytic burner* di bawah 220 ppm (Gambar 2.12). Sehubungan dengan emisi hidrocarbon (UHC), konsentrasi UHC yang diperoleh adalah 80-90 ppm, sementara untuk *non-catalytic burner* 300-400 ppm (Gambar 2.13).



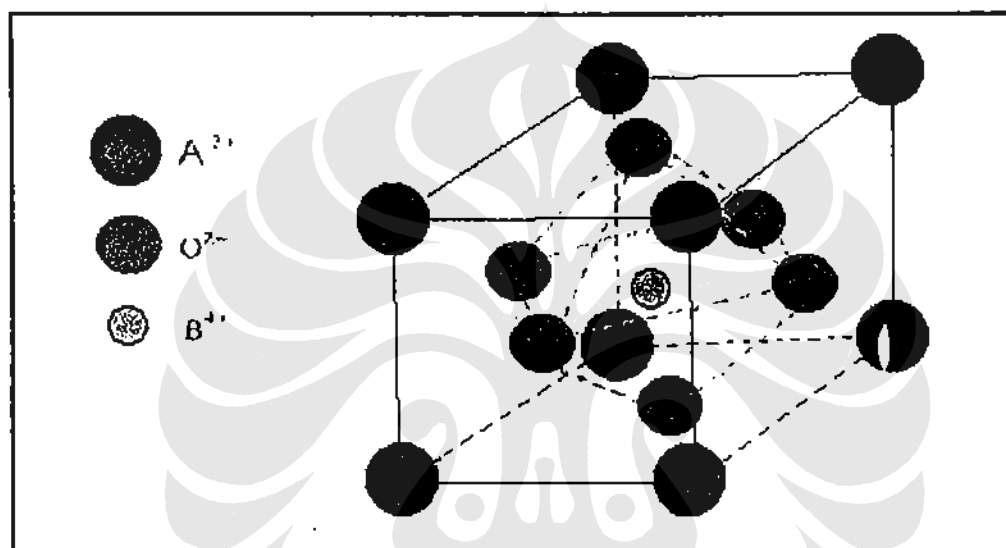
Gambar 2.12 Emisi CO sebagai fungsi E_a untuk beberapa nilai Q (I Cerri et al, 2000)



Gambar 2.13 Emisi HC sebagai fungsi E_a (I Cerri et al, 2000)

II.3.1. Struktur Fasa Aktif Jenis Perovskite

Katalis tipe perovskite terdiri dari komposisi oksida logam. Komposisi oksida logam dinyatakan dengan formula umum $A_{1-x}B_xMO_b$, dimana A adalah elemen-elemen dari lantanida (*rare earth*, dengan nomor atom 57 sampai 71) seperti *Lanthanum*, *neodymium*, *cerrium* atau lainnya, B adalah kation monovalen atau divalen dan M adalah elemen-elemen dari unsur transisi dengan nomor atom 22 sampai 30, 40 sampai 51 dan 73 sampai 80 seperti Co, Mn, Cr, Fe, Ni dan lainnya. a adalah 1 jika b sama dengan 3 dan 2 jika b sama dengan 4, dan x adalah $0 \leq x < 0.7$. (U.S. Patent 5,939,354).



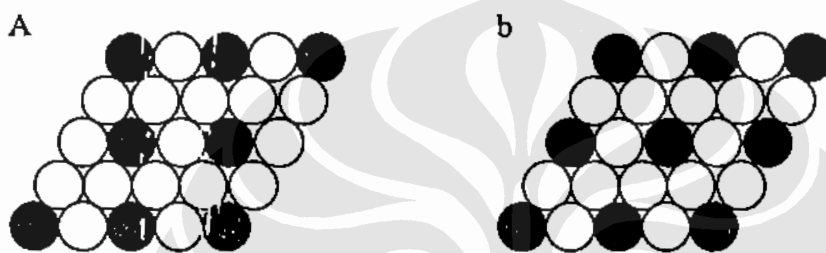
Gambar 2.14 Struktur Perovskite (www.mse.vt.edu)

Untuk perovskite dengan komposisi stoikiometris dapat dinyatakan dengan formula umum ABO_3 . Struktur ABO_3 ini secara umum dapat dikatakan sebagai suatu *lattice face-centered cubic* (FCC) dengan atom-atom A terdapat pada sudut dan atom-atom O pada permukaan. Atom B terletak pada pusat *lattice*. (www.mse.vt.edu). Struktur perovskite dengan komposisi ABO_3 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14

Dalam *Handbook of Catalysis* (Anderson, 1983) disebutkan bahwa senyawa yang mengandung dua elemen atau lebih selain oksigen dapat digolongkan menjadi dua yaitu struktur homodesmik dan struktur heterodesmik tergantung pada perbedaan keelektronegatifan antara elemen apakah lebih kecil atau lebih besar, misalnya senyawa $A_xX_yO_z$; termasuk struktur homodesmik jika A dan X sama sama elektropositif dan termasuk struktur heterodesmik jika A elektropositif dan X elektronegatif. Golongan

pertama biasa disebut dengan oksida kompleks dengan ion oksigen tersusun *close packed*, dan A,X terdistribusi pada daerah kosong secara tetrahedral dan oktahedral.

Menurut Bielanski dan Haber (1991), perovskite merupakan oksida kompleks dimana salah satu ion logamnya mempunyai ukuran yang sama dengan ion oksigen. Untuk senyawa biner yang terdiri dari ion-ion A dan O dengan $r_A/r_O \approx 1$ yang tersusun secara *close packed*, ion-ion positif A tidak kontak dengan ion A lainnya karena terhalang oleh ion O pada rasio O/A paling sedikit 3:1 dengan komposisi senyawa AO_3 . Ion-ion ini dapat disusun dengan dua jalan seperti terlihat pada Gambar 2.15 dimana memperlihatkan lapisan tunggal dari susunan *close packed*.



Gambar 2.15 Susunan *close packed* ion-ion A dan O dengan jari-jari yang sama dalam struktur senyawa AO_3

Struktur kristal dibentuk dengan superimposisi lapisan tunggal tersebut dimana ion-ion A mempunyai koordinasi dodekahedral. Ketika ion-ion logam A merupakan mono atau divalen, muatan negatif yang berlebih harus dikompensasi oleh tipe kation yang kedua, yang memiliki karakteristik ukuran lebih kecil dan menempati tempat kosong dalam struktur *close packed*. Dengan superimposisi seperti pada Gambar 2.15 dan distribusi kation-kation secara oktahedral maka terbentuk struktur perovskite dengan komposisi ABO_3 seperti pada Gambar 2.14. Untuk senyawa ABO_3 stoikiometris terdapat banyak kombinasi A^{a+} dan B^{b+} yang memenuhi kondisi kenetralan elektron $a + b = 6$, dan struktur ini dibentuk oleh oksida-oksida kompleks golongan ion-ion logam transisi IV, V dan VI dengan kation-kation logam alkali atau alkali tanah, yaitu $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $SrZrO_3$, $LaMnO_3$, $LaCrO_3$, $KTaO_3$ dan lain-lain.

Menurut Voorhoeve (1977), kombinasi yang mungkin dari ion-ion A dan B dibatasi oleh persyaratan geometri dan koordinasi (Bielanski and Haber, 1991). Kedua ion A dan B dapat disubstitusi dengan ion-ion lainnya untuk membentuk variasi yang lain.

II.3.2. Teknik Pelapisan *Sol-Gel*

II.3.2.1. Metode sol-gel

Sol dapat didefinisikan sebagai dispersi dari partikel-partikel padat di dalam fasa cair dimana partikel-partikel tersebut berukuran cukup kecil sehingga dapat tersuspensi berdasarkan gerak brown (Hocking, 1989). Menurut Hocking, ukuran partikel berkisar antara 20 Å sampai 1 micron. Sedangkan Gel adalah padatan yang mengandung komponen cair dan struktur jaringan sedemikian hingga kedua solid dan cairan dalam keadaan terdispersi. Menurut Schmidt (1988), proses sol-gel adalah sintesa jaringan anorganik melalui reaksi kimia dalam larutan dengan suhu rendah. Menurut P. Reyes (1991) dan T. Lopez (1991), dengan menggunakan teknik sol-gel untuk preparasi katalis logam, peristiwa sintering dapat dihindari sampai temperatur di atas 1000°C, hal ini karena komponen logam berinteraksi sangat kuat dengan supportnya.

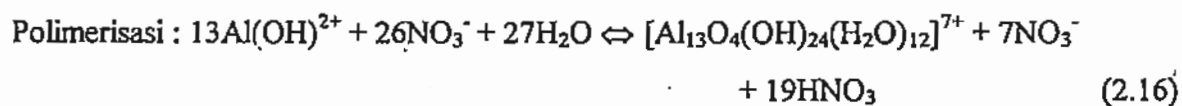
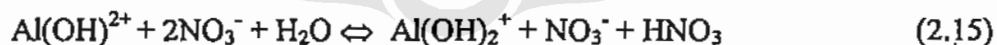
Empat tahapan yang dilakukan dalam proses sol-gel adalah :

1. Preparasi sol.
2. Penempelan sol pada substrat (dalam hal ini plat stainless steel).
3. Pengeringan sol menjadi gel.
4. *Firing* untuk memperoleh *coating* yang kuat.

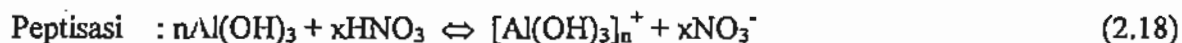
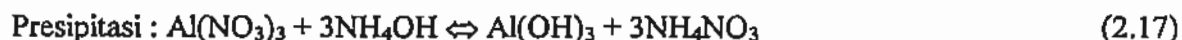
(Hocking, 1989)

Preparasi sol dapat berlangsung dalam dua tahap. Tahap pertama adalah hidrolisa yang diikuti dengan polimerisasi. Tahap kedua adalah presipitasi yang dilanjutkan dengan peptisasi. Berikut ini contoh reaksi pembentukan sol alumina hidroksida:

Tahap 1:



Tahap 2 :

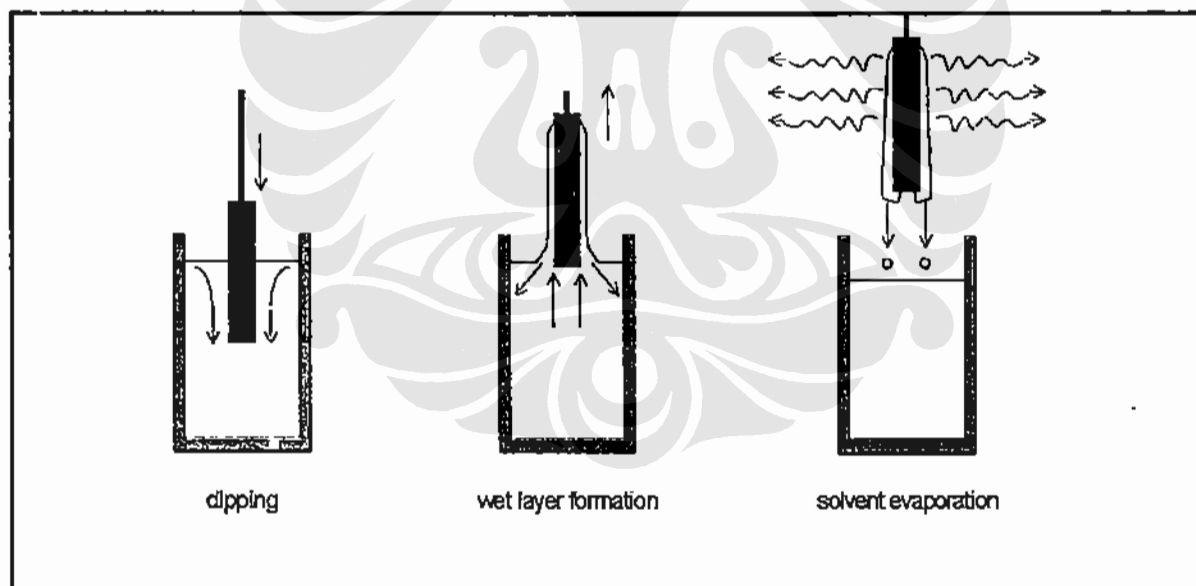


Besar dan stabilitas sol yang dihasilkan tergantung pada sifat material precursor dan rasio anion terhadap oksida logam.

Sol dapat terdeposit pada permukaan substrat dengan cara disemprot (*spraying*), diputar (*spinning*), dan dengan cara dicelup (*dip-coating*) (www.sol-gel.com). Pada penelitian ini selanjutnya akan menggunakan metode *dip-coating*. Keberhasilan aplikasi sol sangat tergantung dari permukaan substrat yang harus melalui proses *cleaning* dan agak kasar (Hocking, 1989). Transformasi dari sol menjadi gel harus dilakukan dengan hati-hati, pengeringan yang dilakukan harus dilakukan secara perlahan dan pada suhu yang tidak terlalu tinggi, pengeringan yang dilakukan secara cepat akan menyebabkan terjadi *gel-crazing*.

Ketebalan coating ditentukan terutama oleh, kecepatan penarikan, kandungan padatan, dan viskositas liquid (H. Schmidt, 2000). Skema proses *dip-coating* diperlihatkan pada Gambar 2.16.

Penguatan pada *coating* yang dihasilkan terjadi ketika substrat yang sudah dilapisi gel di bakar (kalsinasi) pada temperatur $440 - 1200^{\circ}\text{C}$, pada tahap ini dapat terjadi sintering tetapi waktu pemanasannya singkat yaitu hanya kira-kira 15 menit (Hocking, 1989). Sedangkan menurut I Cerri (2000), peristiwa sintering dapat dihindari dengan melakukan proses kalsinasi pada temperatur tidak lebih dari 900°C .



Gambar 2.16 Skema proses *dip-coating* (www.solgel.com)



BAB III

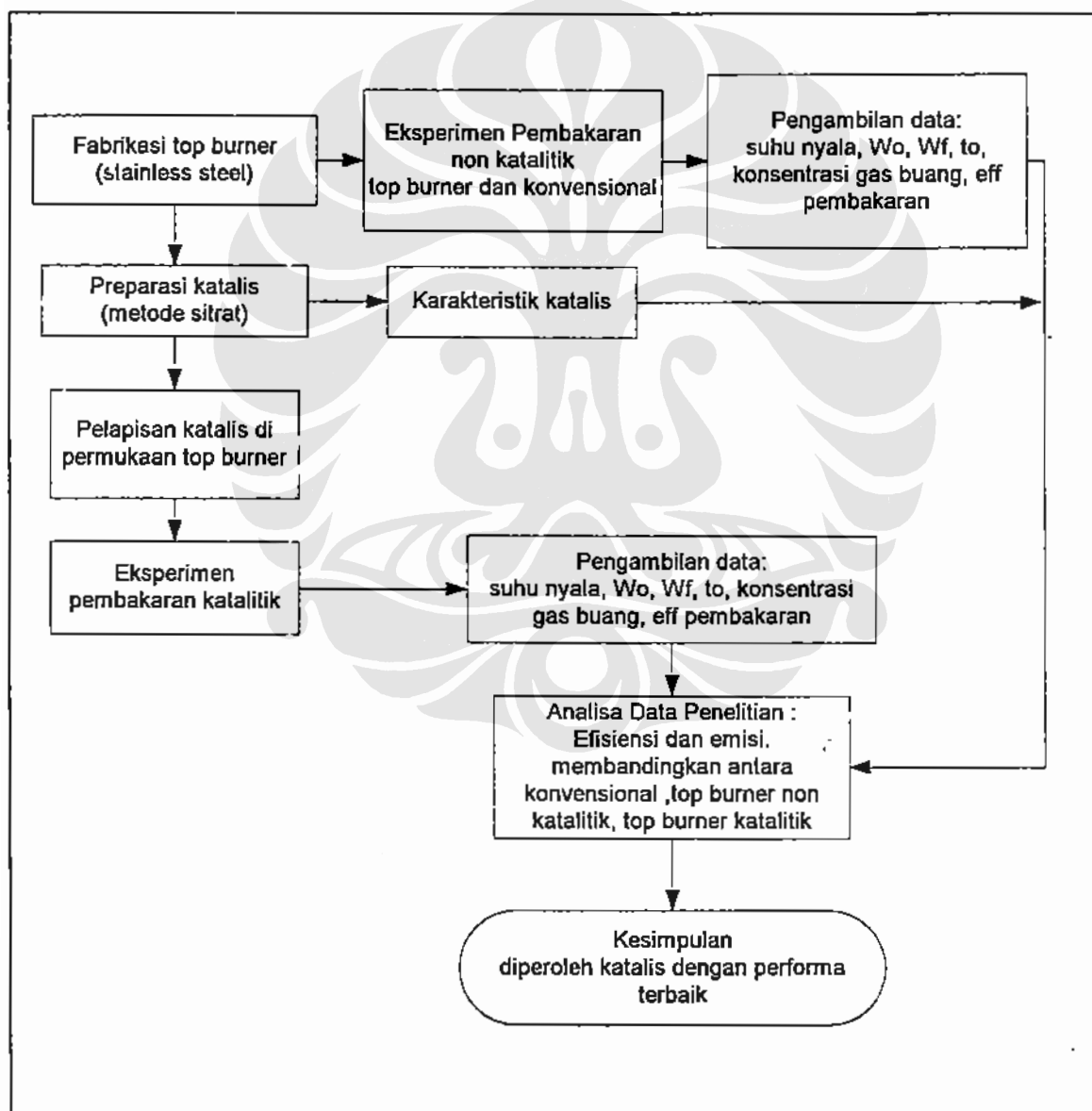
PENELITIAN

BAB III

PENELITIAN

III.1.1 METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia dan Konversi Gas Alam jurusan Teknik Gas dan Petrokimia, kegiatan mencakup preparasi *top burner* preparasi katalis dengan metode sitrat, pelapisan katalis pada *top burner stainless steel* dengan pencelupan berulang dan uji kinerja kompor gas dengan mengukur efisiensi dan emisi hasil pembakaran (non-katalitik dan katalitik). Diagram alir penelitian seperti pada Gambar 3.1.



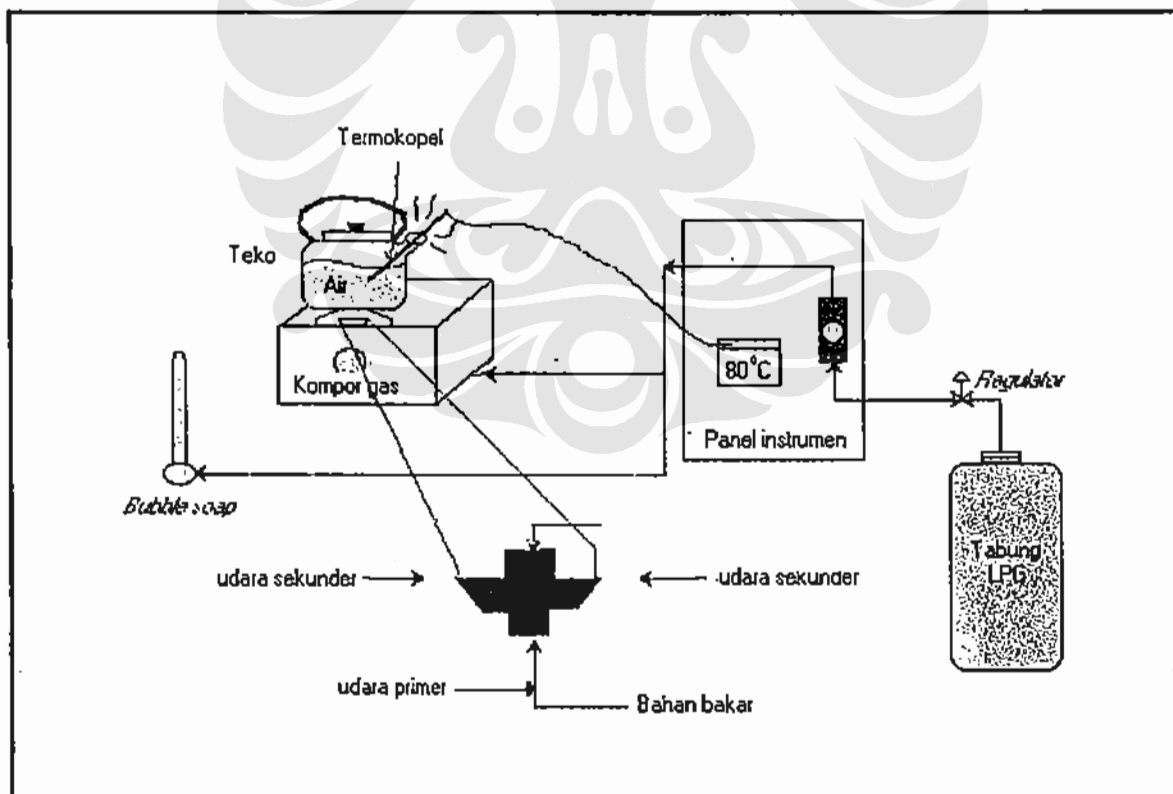
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

III.1.2. RANCANGAN PERCOBAAN

Eksperimen pembakaran pada penelitian ini dilakukan untuk menguji aktifitas katalis yang sudah dilapiskan di atas permukaan *top burner stainless steel* (AISI 301) dengan melihat pengaruhnya terhadap:

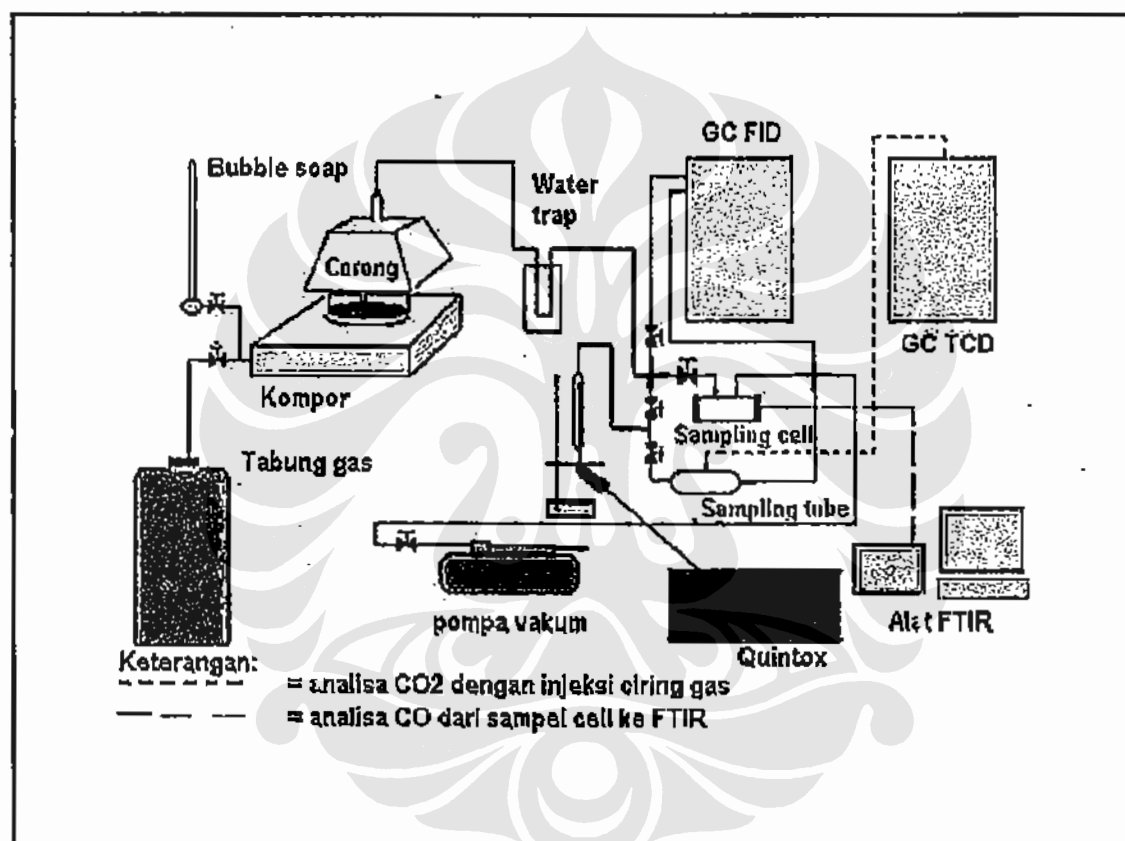
1. Efisiensi termal kompor
2. Reduksi Polutan

Pada penelitian ini akan digunakan prosedur "*water boiling tes*" sebagai metode internasional standart untuk menentukan efisiensi kompor (VITA, 1985). Efisiensi termal kompor dilakukan dengan memasak air sebanyak 2 liter dalam teko yang sudah diisolasi dengan *glass wall*, *galss tape* dan *aluminium foil* dari temperatur ambient sampai mendidih. Efisiensi termal dihitung dengan membandingkan kalor yang diterima oleh sistim dengan kalor yang diberikan bahan bakar. Percobaan dilakukan di atas kompor yang dilengkapi dengan *top burner* tanpa katalis untuk variasi laju alir bahan bakar 700, 900, 1100, dan 1300 ml/menit. Percobaan diulang untuk *top burner* yang dilapisi katalis LaCrO_3 , LaMnO_3 dan LaCoO_3 , untuk variasi laju alir yang sama. Sistim pengukuran efisiensi termal kompor seperti terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Sistem per gukuran efisiensi termal kompor

Pengukuran gas hasil pembakaran dilakukan dengan menggunakan GC FID untuk emisi C_3 dan C_4 , GC TCD untuk emisi CO, dan QUINTOX untuk emisi CO_2 dan NO_x . Untuk penentuan dengan GC, data yang diperoleh berupa area peak gas buang hasil pembakaran dengan waktu retensi tertentu. Berdasarkan area peak tersebut dapat dihitung konsentrasi tiap komponen gas buang dalam satuan ppm. Pengukuran dengan QUINTOX dilakukan dengan cara mengalirkan secara *online* gas buang hasil pembakaran menuju alat sehingga didapat data NO_x dalam ppm dan CO_2 dalam % volum. Sistem pengukuran gas hasil pembakaran seperti terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Sistem pengukuran emisi gas

III.2. ALAT DAN BAHAN PENELITIAN

III.2.1. Alat-alat penelitian

A. Peralatan preparasi katalis

- ◆ Beaker glass (1000, 250, 100, 50 ml)
- ◆ Gelas ukur (100, 10 ml)
- ◆ Filter vakum
- ◆ Hot Plate (Jenway, 1100 Hot plate dan stirrer)
- ◆ Cawan porselen
- ◆ Stirrer
- ◆ Pompa vakum (Robin Air Vacuum Master, Motor HP 1/3, Capacity 93 L/M, Hertz 50/60, amps : 6.3-6.8/3.3-4.0)
- ◆ Vacuum Furnace (Fhret)
- ◆ Calcinazer
- ◆ Neraca elektrik (Mettler AE 200)
- ◆ Spatula
- ◆ Termometer
- ◆ Ultrasonic cleaner
- ◆ Pipet tetes

B. Peralatan Karakterisasi

- ◆ Karakterisasi BET
- ◆ Karakterisasi FTIR
- ◆ Karakterisasi XRD
- ◆ Karakterisasi SEM

C. Peralatan uji kinerja

- ◆ Kompor gas
Spesifikasi:
Merk Rinnai model RT-501A, tinggi = 161.5 mm, lebar = 280 mm, panjang = 380 mm, berat bersih = 2.4 kg, konsumsi gas/jam = 4100 kcal, sambungan pipa gas = selang karet 3/8".
- ◆ Buble soap
- ◆ Stop watch
- ◆ Bunsen logam kuningan
- ◆ Termokopel (Tipe K, range : 20-700 °C)
- ◆ Teko
- ◆ Pompa vakum
- ◆ Pyrometer (Minolta TR-690/690A)
- ◆ Alat analisa GC (GC Shimadzu 9A-CR3, detektor FID; GC Shimadzu 8-APT & C-R6A, detektor TCD; FTIR-Genesis, AT1 Mattson; Quintox)

III. 2.2. BAHAN-BAHAN PENELITIAN

♦ *Top burner stainless steel*

Type: AISI 301, bentuk plat silang, berat : gr, ukuran (panjang = 4 cm, lebar = 1 cm, tebal 1 mm)

Tabel 3.1 Komposisi *Stainless steel* tipe AISI 301 (Perry, 1984)

Komponen	Komposisi (%)
Cr	16-18
Ni	6-8
C	0,15
Si	1
Mn	2
Fe	70,85-74,85

- ♦ $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck)
- ♦ $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Merck)
- ♦ $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Merck)
- ♦ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck)
- ♦ $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Merck)
- ♦ H_2SO_4
- ♦ NaCl
- ♦ Aseton (Brataco Chemical)
- ♦ Bahan isolasi teko (Glass wall, glass tape, dan aluminium foil)
- ♦ Bahan bakar gas LPG dengan spesifikasi:
Berat tangki (Tw) = 41.9 kg, berat Propana = 11 kg, berat Butana = 13 kg (Pertamina)
- ♦ dll

III.3. PROSEDUR PENELITIAN

III. 3.1. Preparasi *top burner* dan Katalis

1. *Top burner* stainless steel dicuci dengan aseton menggunakan ultrasound selama 60 menit, kemudian dibilas dengan air dan dikeringkan.
2. Siapkan larutan 100 ml (mengandung 10 gr H_2SO_4 dan 20 gr NaCl)
3. Rendam *top burner* ke dalam larutan 2 selama 1 menit untuk meningkatkan kekasaran *top burner*.
4. Keringkan *top burner* dalam *vacuum furnace* pada suhu 120° selama 1 jam
5. Timbang *top burner* didapat W_0 .

III.3.1.2 Pembuatan Larutan Precursor Katalis

Precursor LaMnO₃ (0,4 : 1)

- 21,65 gr La(NO₃)₃.6H₂O dan 49,25 gr Mn(NO₃)₂.4H₂O dilarutkan dalam air untuk memperoleh larutan dengan konsentrasi 1 M dan volume 50 ml.
- $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LaMnO}_3 + 10\text{H}_2\text{O} + 5\text{NO} + 7/2 \text{O}_2$
- Konsentrasi larutan perovskite = 1 M
- Volume = 50 ml
- Mol Perovskite = 0,05 mol
- Berat La(NO₃)₃.6H₂O = 21,65 gr
- Mn(NO₃)₂.4H₂O = 0,125 mol = 49,25 gr
- Asam sitrat monohydrate (C₆H₈O₇.H₂O) ditambahkan ke dalam larutan dengan rasio molar C₆H₈O₇.H₂O/total kation = 1
- Mol C₆H₈O₇.H₂O = 0,1
- Berat C₆H₈O₇.H₂O yang ditambahkan = 21 gr
- Pencampuran dilakukan dengan pengadukan pada suhu 80°C selama 2 jam sehingga diperoleh larutan sol yang viscous

Precursor LaCrO₃

- 21,65 gr La(NO₃)₃.6H₂O dan 50 gr Cr(NO₃)₃.9H₂O dilarutkan dalam air untuk memperoleh larutan dengan konsentrasi 1 M dan volume 50 ml.
- $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LaCrO}_3 + 15\text{H}_2\text{O} + 6\text{NO} + 9/2 \text{O}_2$
- Konsentrasi larutan perovskite = 1 M
- Volume = 50 ml
- Mol Perovskite = 0,050 mol
- Berat La(NO₃)₃.6H₂O = 21,65 gr
- Cr(NO₃)₃.9H₂O = 0,125 mol = 50 gr
- Asam sitrat monohydrate (C₆H₈O₇.H₂O) ditambahkan ke dalam larutan dengan rasio molar C₆H₈O₇.H₂O/total kation = 1
- Mol C₆H₈O₇.H₂O = 0,1
- Berat C₆H₈O₇.H₂O yang ditambahkan = 21 gr
- Pencampuran dilakukan dengan pengadukan pada suhu 80°C selama 2 jam sehingga diperoleh larutan sol yang viscous

Precursor LaCoO_3

- 21,65 gr $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 36,375 gr $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dilarutkan dalam air untuk memperoleh larutan dengan konsentrasi 1 M dan volume 50 ml.
- $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LaCoO}_3 + 12\text{H}_2\text{O} + 5\text{NO} + 7/2 \text{O}_2$
- Konsentrasi larutan perovskite = 1 M
- Volume = 50 ml
- Mol Perovskite = 0,05 mol
- Berat $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 21,65 gr
- $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 0,125 mol = 36,375 gr
- Asam sitrat monohydrate ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ditambahkan ke dalam larutan dengan rasio molar $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O} / \text{total kation} = 1$
- Mol $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O} = 0,1$
- Berat $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ yang ditambahkan = 21 gr
- Pencampuran dilakukan dengan pengadukan pada suhu 80°C selama 2 jam sehingga diperoleh larutan sol yang viscous

III.3.1.3 Pelapisan *Top Burner*

1. Pencelupan *top burner stainless steel* secepat mungkin setelah di-*preheating* pada suhu 900°C ke dalam larutan sol selama 2 jam
2. Pengeringan pada suhu 120°C , selama 5 jam atmosferic furnace
3. Menimbang port katalitik → didapatkan berat W
- Berat katalis perovskite = ΔW
- Menghitung $\Delta W / W_o = (W - W_o) / W_o$
4. Pencelupan dilakukan berulang sampai mencapai nilai $\Delta W / W_o$ yang diinginkan yaitu 2%.
5. Kalsinasi pada suhu 900°C selama 6 jam dalam atmosferic furnace

III.3.2 KARAKTERISASI KATALIS

Karakterisasi katalis yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi:

- ♦ **SEM**, akan dilakukan dalam penelitian ini untuk mengetahui ketebalan lapisan hasil pelapisan. Sampel yang dianalisa berupa plat stainless steel yang telah dilapisi katalis dengan ukuran $2 \times 0.5 \times 0.1$ cm, dimana plat tersebut dipreparasi dan dilapisi secara bersamaan dengan top burner stainless steel. Sebelum dianalisa, sampel dilapisi dengan emas pada kondisi vakum selama kurang lebih 1 jam, setelah itu discan dengan voltase 20.1 kv dan perbesaran tertentu. Karakterisasi ini dilakukan di Laboratorium Jurusan Metalurgi FTUI.
- ♦ **BET**, akan dilakukan dalam penelitian ini untuk mengetahui ukuran porositas katalis hasil preparasi yang dicoating pada *top burner*. Sampel yang dianalisa berupa serbuk yang diperoleh dengan cara mengeringkan dan mengkalsinasi larutan precursor katalis, bersamaan dengan *top burner* katalitik. Karakterisasi ini akan dilakukan di Laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia dan Konversi Gas Alam TGP FTUI.
- ♦ **EDAX**, akan dilakukan dalam penelitian ini untuk mengetahui komposisi kristal yang terbentuk dari katalis hasil preparasi yang dicoating pada *top burner*. Sampel yang dianalisa berupa lempengan sampel. Karakterisasi ini akan dilakukan di Laboratorium Jurusan Metalurgi FTUI.



BAB IV

HASIL PENELITIAN

DAN PEMBAHASAN

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. PEMBUATAN *TOP BURNER*

Top burner merupakan aksesoris yang ditambahkan di atas *burner* dalam usaha untuk meminimalisir terbuangnya panas ke lingkungan. *Top burner* yang digunakan dalam penelitian ini dilapisi dengan tiga macam jenis katalis yaitu, LaMnO_3 , LaCrO_3 dan LaCoO_3 untuk melihat pengaruh dari masing-masing katalis terhadap efisiensi termal dan reduksi polutan dalam pembakaran LPG. Agar efek yang dihasilkan betul-betul merupakan efek katalitik, maka geometri *top burner* yang dipilih dalam penelitian ini dibuat sesederhana mungkin agar dapat dibuat seseragam mungkin antara satu dengan yang lainnya sehingga dapat dihasilkan bentuk flame yang seragam pula. Bentuk *top burner* yang dipilih seperti terlihat pada Gambar 4.1 terbuat dari bahan *stainless steel* AISI 301 berdimensi 4 cm x 1 cm.



Gambar 4.1 *Top Burner* Plat silang

4.2. Hasil pelapisan katalis di atas permukaan *top burner*

Tahapan yang dilakukan untuk pelapisan *top burner* dengan katalis adalah:

- Pembuatan larutan *precursor* dengan metode sitrat
- *Pre-heating top burner* sampai suhu 900°C
- Pencelupan *top burner* ke dalam larutan *precursor* sampai diperoleh *loading* sekitar 2%

Top burner yang sudah di-*preheating* pada suhu 900°C dicelupkan ke dalam larutan *precursor* lalu ditahan selama 2 menit, kemudian ditarik secara perlahan-lahan dengan kecepatan 50 mm per menit. Pre-heating pada suhu 900°C yang dilakukan pada *top burner* dimaksudkan agar terjadi ikatan yang baik antara kristal katalis dengan permukaan *top burner* yang akan dilapisi.

Pada penelitian ini, dilakukan tiga kali pencelupan untuk memperoleh *loading* katalis yang diinginkan. Antara pencelupan yang satu dengan lainnya diselingi dengan pengeringan pada suhu 120°C selama 1 jam.. Selanjutnya dilakukan kalsinasi pada suhu 900°C selama 6 jam untuk mendekomposisikan dan menguapkan senyawa nitrat dan air, dan untuk terbentuknya kristal-kristal fasa aktif yang terdeposisi pada permukaan *top burner*.

Pelapisan katalis telah berhasil dilakukan, dapat dilihat dari hasil pengamatan visual setelah dilakukan kalsinasi terlihat adanya lapisan tipis pada permukaan *top burner* dan dari hasil analisa SEM yang dilakukan terlihat adanya lapisan yang terbentuk pada permukaan *top burner* (Gambar 4.2), selain itu dapat juga dilihat dari adanya penambahan berat *top burner* yang menunjukkan peningkatan persen deposisi. Besarnya deposisi katalis *perovskite* pada *top burner stainless steel* setelah dilakukan pencelupan sebanyak tiga kali dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Deposisi katalis pada *top burner stainless steel*

Top Burner	pencelupan		penambahan berat (gr)	% deposisi
LaCrO ₃	w ₀	6,2918		
	w ₁	6,4008	0,1090	1,73
	w ₂	6,4156	0,1238	1,97
	w ₃	6,4176	0,1258	2,00
LaMnO ₃	w ₀	6,2762		
	w ₁	6,3889	0,1127	1,80
	w ₂	6,3989	0,1227	1,96
	w ₃	6,4021	0,1259	2,01
LaCoO ₃	w ₀	6,0149		
	w ₁	6,1289	0,1140	1,90
	w ₂	6,1330	0,1181	1,96
	w ₃	6,1360	0,1211	2,01

W₀ = berat *top burner* mula-mula; W₁, W₂, W₃ berat *top burner* setelah pencelupan pertama, kedua dan ketiga.

Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa pada pencelupan pertamakali, penambahan berat yang dihasilkan cukup besar. Pada pencelupan kedua dan ketiga, penambahan berat yang dihasilkan tidak terlalu signifikan walaupun tidak sampai turun, hal ini mungkin disebabkan oleh turut melarutnya sebagian kecil katalis yang sudah terlapisi pada permukaan *top burner stainless steel*.

4.3. HASIL KARAKTERISASI

4.3.1. Karakterisasi SEM

Sampel untuk karakterisasi SEM berupa *top burner* yang telah dilapisi katalis dengan ukuran 0,5 cm x 0,5 cm x 1 mm. Foto hasil *scanning* karakterisasi SEM dapat dilihat pada Gambar 4.2.

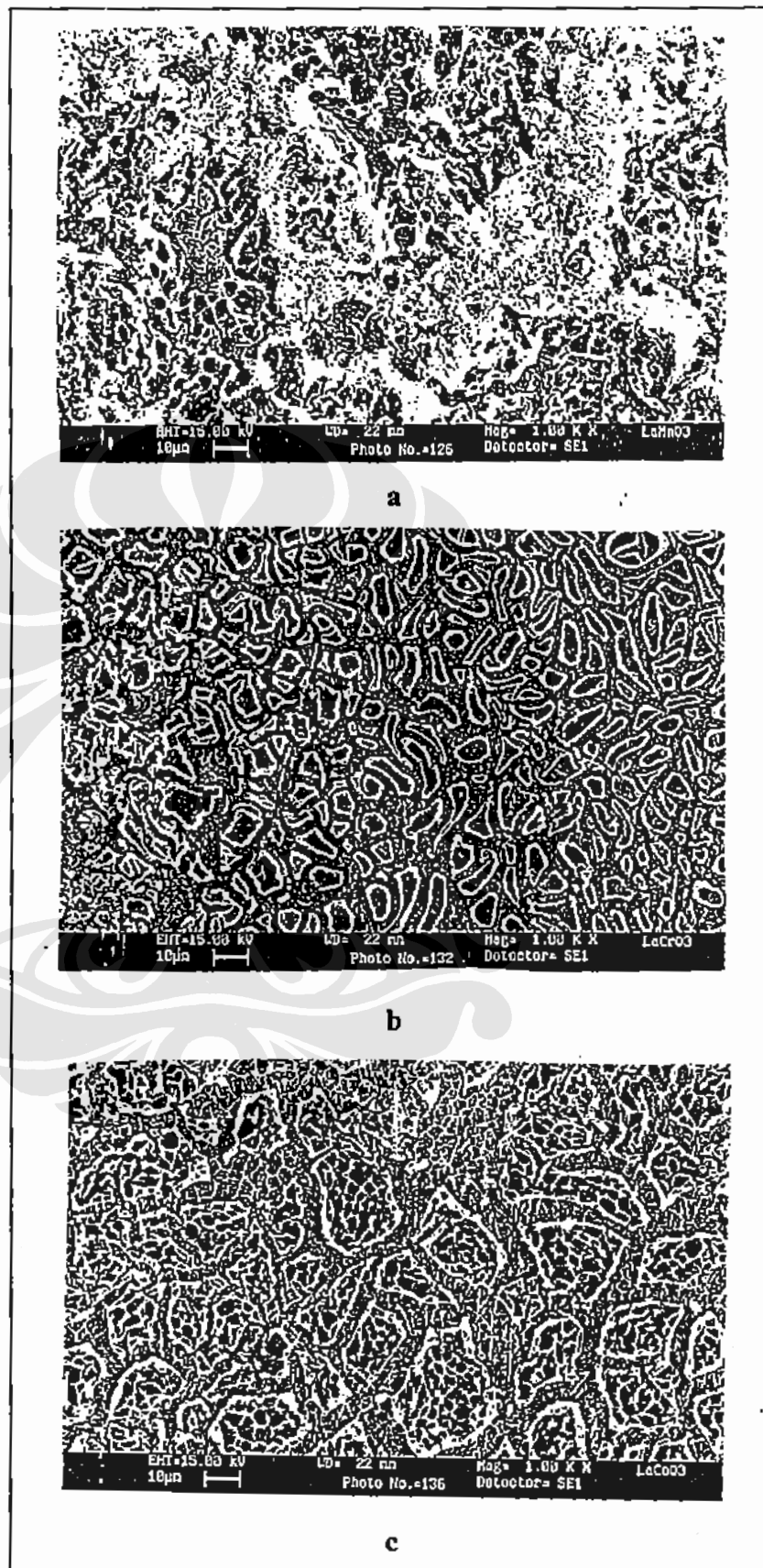
Scanning dilakukan dengan voltase dan magnifikasi sebesar 25 kV dan $1,55 \times 10^3$. Dari hasil SEM Gambar 4.2.a sampai 4.2.c terlihat bahwa terdapat keretakan pada hasil pelapisan katalis, hal ini bisa terjadi karena pembentukan film tipis terjadi kurang sempurna. Suhu *aging* pada saat pembuatan sol sangat berpengaruh, pada pemanasan dengan suhu yang tidak konstan pada 80°C, sol yang terbentuk menjadi tidak merata sehingga pada saat pelapisan menjadi terlalu tebal dan gampang retak.

Adhesivitas dari lapisan katalis juga kurang baik walaupun sudah dilakukan *pre-heating* pada suhu 900°C sebelum pelapisan dilakukan. Setelah digunakan untuk uji kinerja kompor gas, *top burner* yang sudah digunakan ditimbang kembali dan ternyata *loading* yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan sebelum digunakan, ini dapat dilihat pada Tabel 4.2. berikut ini

Tabel 4.2 Kondisi *loading* setelah *top burner* digunakan

Top Burner	Loading sebelum digunakan gr	Loading setelah digunakan gr	penurunan %
LaMnO ₃	0,1259	0,1029	18,3
LaCrO ₃	0,1258	0,1045	16,9
LaCoO ₃	0,1211	0,1002	17,3

Dengan mengetahui densitas dari katalis perovskite yang digunakan yaitu sebesar 5,56; 5,38; dan 5,84 g/cm³ untuk katalis LaMnO₃, LaCrO₃ dan LaCoO₃ berturut-turut, kemudian luas area *top burner* yang digunakan sebesar 8 cm², didapat ketebalan lapisan katalis LaMnO₃, LaCrO₃ dan LaCoO₃ di atas permukaan *top burner* berturut-turut adalah 28 µm, 29 µm dan 26 µm.



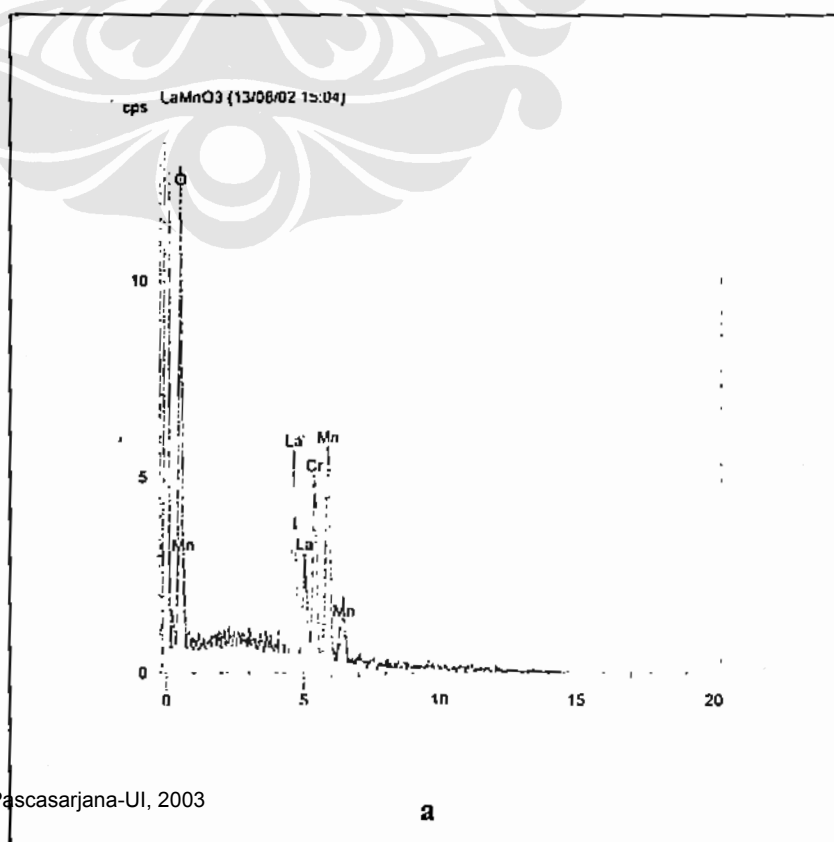
Gambar 4.2 Hasil karakterisasi SEM: a. LaMnO₃, b. LaCrO₃, c. LaCoO₃

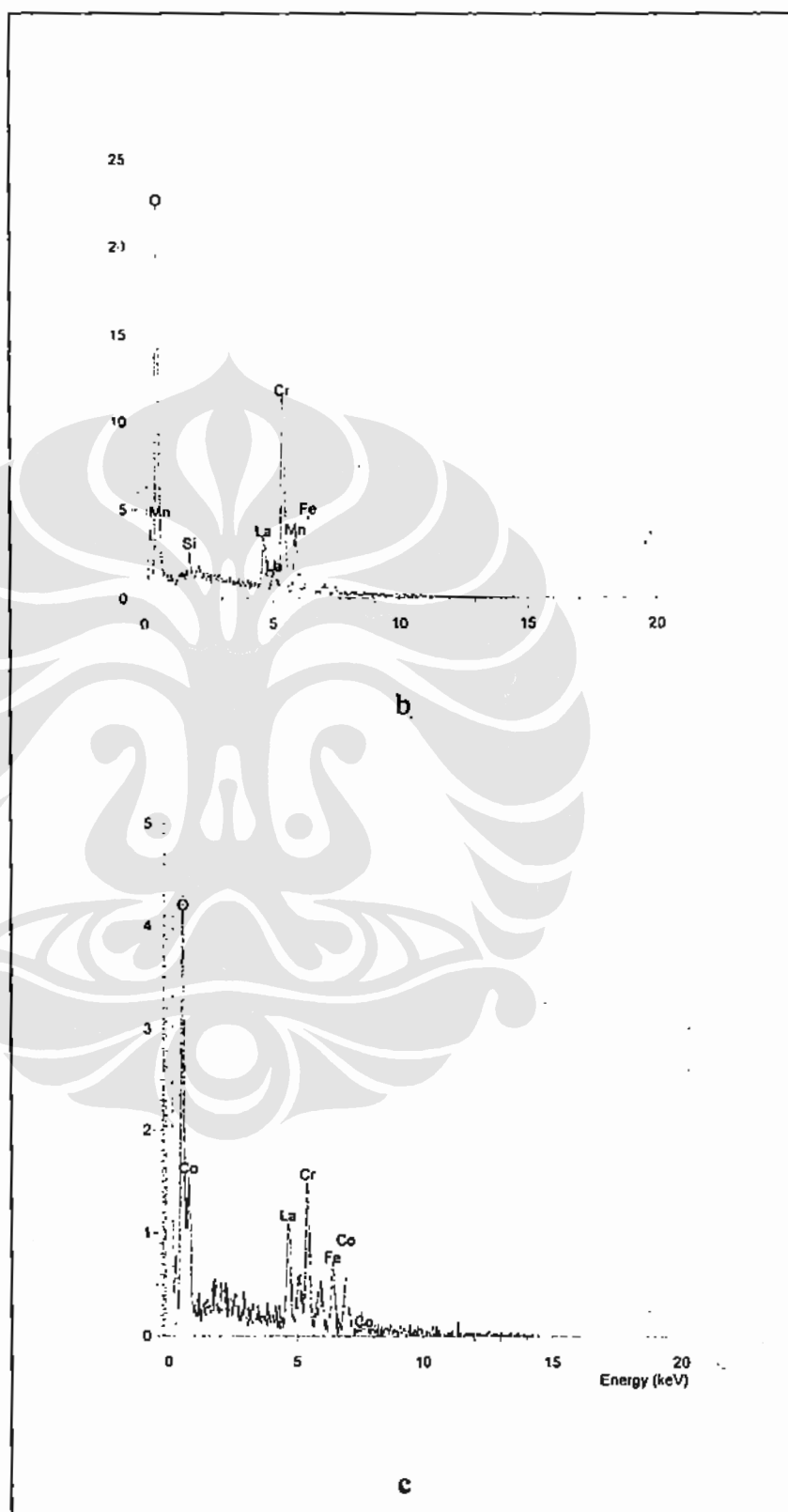
4.3.2. Karakterisasi EDAX (X-RAY)

Analisa X-RAY dilakukan dengan *SiLi Detector* 15 kV berguna untuk melihat unsur-unsur apa saja yang terdapat pada lapisan yang terbentuk di atas permukaan *top burner*. Grafik dan data yang dihasilkan dari analisa ini dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.3, dapat dilihat bahwa pada lapisan yang terbentuk terdapat unsur-unsur penyusun katalis sesuai yang diinginkan, jadi analisa X-RAY menguatkan hasil analisa SEM yang dilakukan.

Tabel 4.3 Hasil analisa X-RAY

Jenis Katalis	% Unsur				
	O	La	Mn	Cr	Co
LaMnO ₃	53,92	9,54	14,39	14,39	-
LaCrO ₃	55,86	3,36	-	22,48	-
LaCoO ₃	59,16	6,43	-	13,81	9,38





Gambar 4.3 Hasil karakterisasi EDAX: a LaMnO_3 , b. LaCrO_3 , c. LaCoO

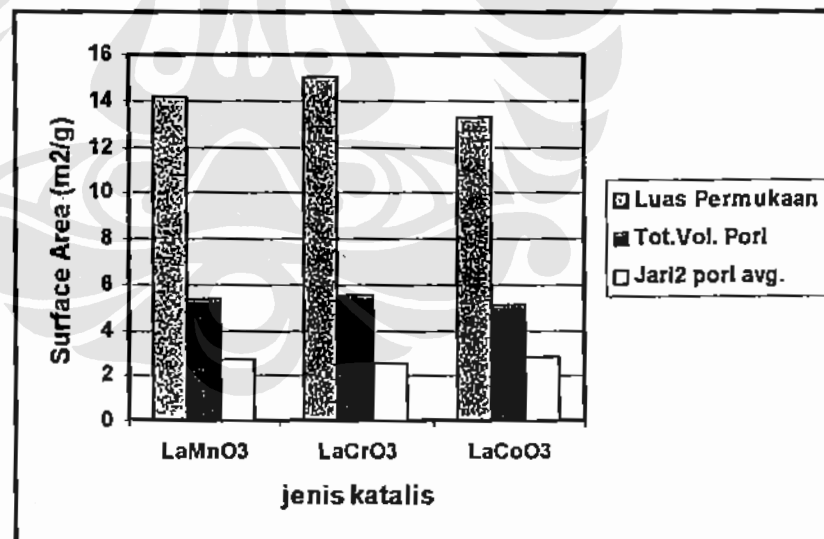
4.3.3. Karakterisasi BET

Luas permukaan katalis pada *top burner* diperkirakan mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap kinerja kompor gas katalitik. Luas permukaan katalis yang besar memungkinkan terjadi kontak yang besar antara bahan bakar dan udara pada *active site* katalis sehingga diharapkan lebih banyak bahan bakar yang terkonversi dan polutan yang dapat direduksi.

Dari hasil karakterisasi BET Autosorb diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 4.4 Data hasil karakterisasi BET (LaCrO_3)

Katalis	Data		
	Luas permukaan (m^2/g)	Total Volume pori ($\text{cc/g} \times 10^4$)	Radius pori rata-rata ($\text{\AA}^\circ$)
LaMnO_3	13,15	5,32	2,75
LaCrO_3	15,05	5,51	2,55
LaCoO_3	12,25	5,13	2,85

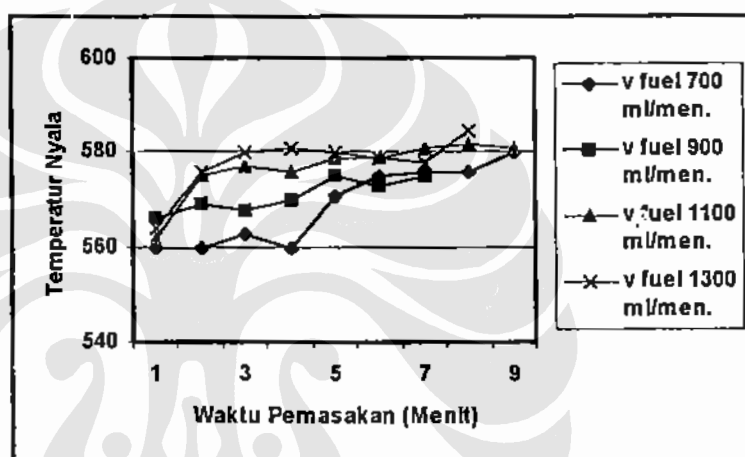


Gambar 4.4 Hasil karakterisasi BET

Dari Tabel 4.4 dan Gambar 4.4 di atas dapat dilihat bahwa katalis LaCrO_3 mempunyai luas permukaan dan total volume pori yang paling besar diantara jenis katalis yang lainnya. Dengan demikian dapat diperkirakan bahwa katalis LaCrO_3 dapat lebih meningkatkan kinerja kompor gas katalitik dibandingkan dengan jenis katalis yang lain.

4.4. KARAKTERISTIK NYALA API

Temperatur nyala pembakaran dapat digunakan untuk melihat apakah proses pembakaran berlangsung dalam kondisi *lean* (*excess air*), *stoichiometris* atau *rich* (kaya bahan bakar). Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa pembakaran pada laju 700 ml/menit menghasilkan temperatur nyala paling rendah karena perbandingan mol udara bahan bakar pada laju ini lebih besar dibandingkan dengan laju yang lain. Selanjutnya temperatur nyala naik dengan naiknya laju alir. Fluktuasi temperatur nyala seperti terlihat pada Gambar 4.5 dipengaruhi oleh udara sekunder yang masuk ke daerah pembakaran.



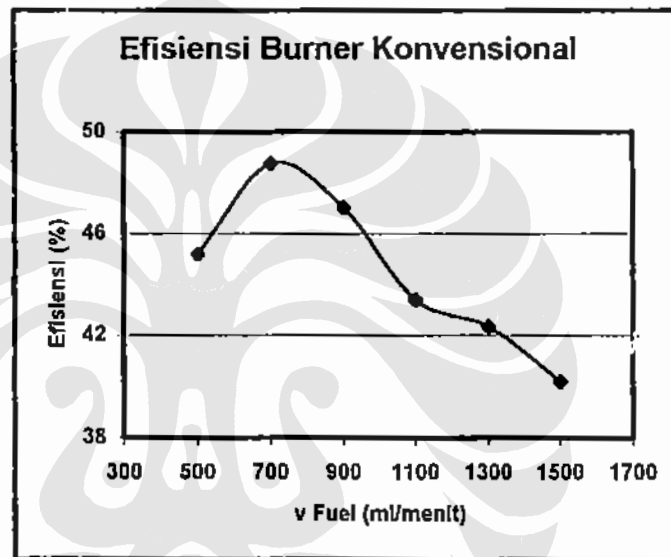
Gambar 4.5. Profil temperatur nyala fungsi waktu pembakaran pada top burner LaCrO_3

4.5. POWER DAN EFISIENSI TERMAL

Kinerja termal diukur sebagai input power dan efisiensi termal untuk jenis top burner yang digunakan. Eksperimen penentuan efisiensi termal suatu kompor dilakukan dengan memasak air sebanyak 2 liter dalam sebuah teko yang sudah diisolasi dengan *glass wall*, *glass tape* dan *aluminium foil*. Air di dalam teko dimasak hingga mendidih (sebagian air menguap). Efisiensi termal dihitung dengan membandingkan kalor yang diterima air di dalam teko dengan kalor yang dilepaskan bahan bakar selama proses pemasakan (persamaan 2.15). Metode perhitungan input power dan efisiensi termal dapat dilihat pada Lampiran D.

Tabel 4.5 dan Gambar 4.6 berikut ini memperlihatkan bahwa input power untuk penelitian ini berkisar antara 2,0 sampai 3,8 kW. Untuk input power yang sama, top burner tanpa katalis dan katalitik memperlihatkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kompor konvensional. Untuk top burner tanpa katalis, hal ini disebabkan oleh

Eksperimen juga dilakukan untuk mengetahui pada laju berapa burner konvensional diperkirakan mengalami reaksi stoikiometris. Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa efisiensi tertinggi dihasilkan pada laju pembakaran 700 ml/menit, diperkirakan pada laju ini proses pembakaran berlangsung pada kondisi stoikiometris. Sementara pada laju lebih besar dari 700 ml/menit pembakaran berlangsung pada kondisi *rich* sehingga banyak kalor yang terbawa oleh bahan bakar berlebih yang mengakibatkan efisiensi pembakaran menjadi turun. Pada laju lebih kecil dari 500 ml/menit kompor tidak menyala karena jumlah mol bahan bakar tidak cukup untuk bereaksi dengan udara.



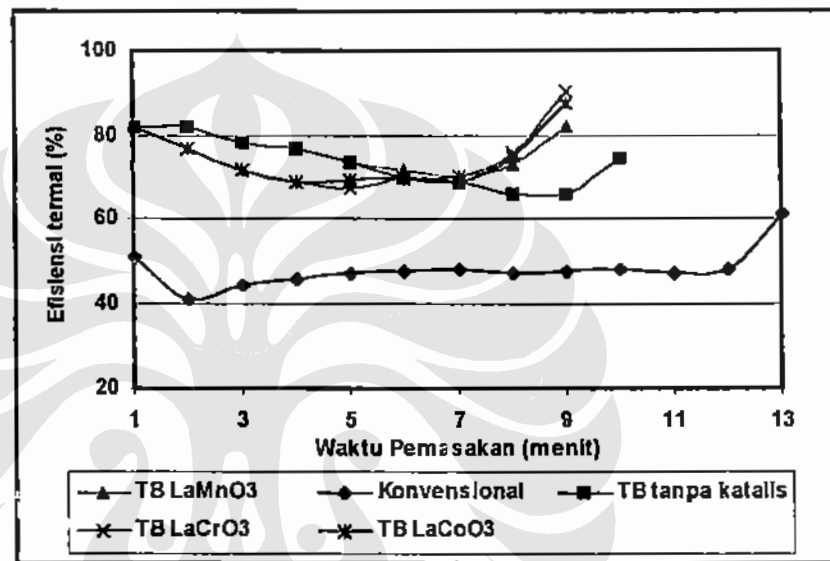
Gambar 4.7 Profil efisiensi termal pada burner konvensional

4.5.1. Pengaruh Waktu Pemasakan

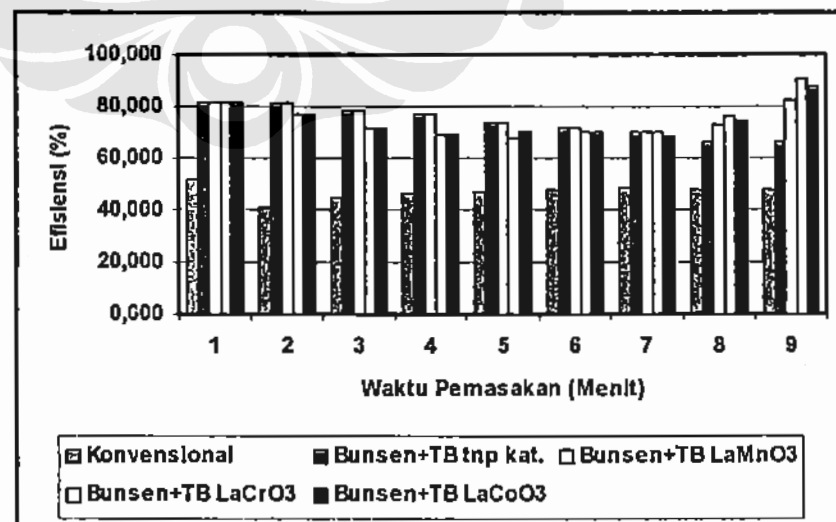
Reaksi pembakaran dengan adanya aktifitas katalitik akan berlangsung lebih cepat, hal ini dimungkinkan karena energi aktivasi reaksi menjadi lebih kecil dibandingkan reaksi non-katalitik sehingga kapasitas spesifik pembakaran (laju pelepasan kalor per satuan luas nyala) menjadi lebih besar.

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pada awal pemasakan efisiensi termal sangat tinggi, hal ini karena suhu air mengalami peningkatan yang sangat cepat sebagai akibat dari energi yang diberikan oleh bahan bakar hampir seluruhnya diserap oleh air di dalam teko. Kemudian gradien suhu air menurun sebagai akibat mulai terjadi radiasi panas ke lingkungan sehingga efisiensi juga menjadi turun sampai pada titik tertentu suhu air tidak mengalami penurunan dan kenaikan yang terlalu mencolok, tetapi ketika air sudah mulai menguap sebagian dimana kalor laten air dipertimbangkan, efisiensi untuk setiap top burner naik secara drastis seperti diperlihatkan pada Gambar 4.8. Diperlihatkan juga bahwa

efisiensi pembakaran yang dihasilkan oleh pembakaran dengan *top burner* katalitik selalu lebih tinggi dibandingkan dengan *port* konvensional, sedangkan jika dibandingkan dengan *top burner* tanpa katalis pada awal pembakaran tidak ada perbedaan yang signifikan tetapi secara keseluruhan waktu pembakaran kelihatan ada perbedaan. Hal ini disebabkan sifat dari *top burner* katalitik yang memiliki kelembaman kalor yang tinggi sehingga dapat meningkatkan *power density* atau kapasitas spesifik pembakaran.



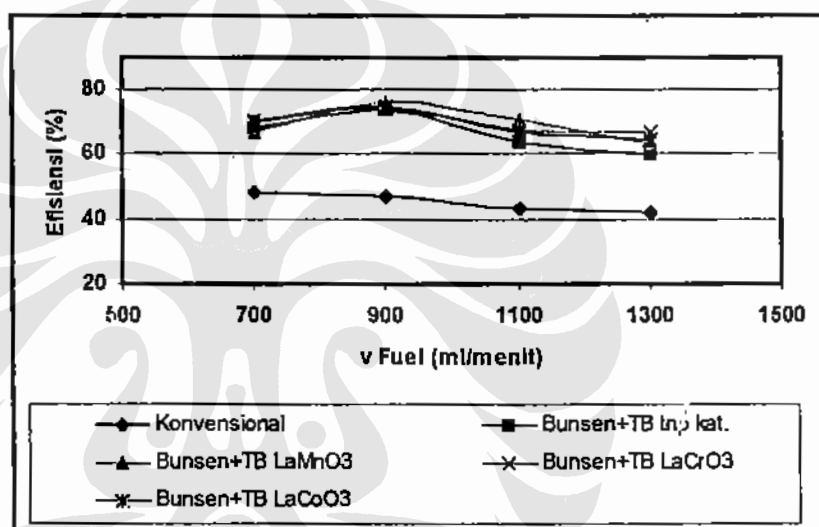
Gambar 4.8 Efisiensi termal kompor gas sebagai fungsi waktu pemasakan pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit



Gambar 4.9 Efisiensi termal kompor gas sebagai fungsi waktu pemasakan pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit (dalam bentuk kolom)

4.5.2. Pengaruh Laju Alir Bahan Bakar

Laju alir bahan bakar sangat berpengaruh dalam suatu reaksi pembakaran gas karena sangat menentukan rasio udara bahan bakar yang terlibat dalam proses pembakaran yang berarti menentukan apakah pembakaran berlangsung pada kondisi *lean*, *stoikiometris* atau *rich*. Pada penelitian ini, perhitungan efisiensi termal kompor gas dilakukan dengan memvariasikan laju alir gas LPG yang digunakan, yaitu 700, 900, 1100, dan 1300 ml/menit. Pengaruh laju alir bahan bakar terhadap efisiensi termal kompor gas pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.10.

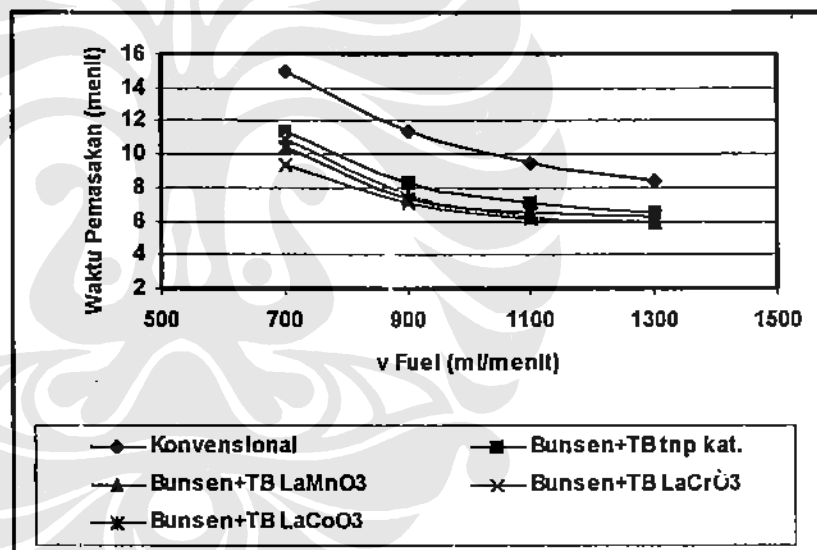


Gambar 4.10 Efisiensi termal kompor sebagai fungsi laju bahan bakar

Dari Gambar 4.10 di atas terlihat bahwa efisiensi tertinggi dicapai pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit. Peningkatan laju bahan bakar akan menurunkan efisiensi termal, hal ini karena pembakaran terjadi pada kondisi *rich* dimana kalor yang diberikan bahan bakar lebih banyak terbawa bahan bakar berlebih, sedangkan pembakaran pada laju bahan bakar 700 ml/menit berlangsung pada kondisi *lean* yang juga akan menyebabkan hilangnya sebagian kalor yang disuplay bahan bakar karena terbawa udara berlebih.

Secara umum dapat dilihat bahwa pembakaran katalitik memiliki efisiensi yang selalu lebih tinggi dibandingkan untuk pembakaran non-katalitik untuk tiap laju alir bahan bakar yang divariasikan. Dibandingkan dengan *port* konvensional yang memiliki orientasi nyala menyebar, *top burner* katalitik yang hanya memiliki satu nyala yang langsung mengarah ke media yang dipanasi akan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi karena *heat loss* yang terlepas ke lingkungan lebih kecil dibandingkan *port* konvensional. Untuk

pengaruh katalitik dengan variasi laju bahan bakar, dibandingkan dengan *top burner* tanpa katalis, efisiensi yang dihasilkan oleh *top burner* katalitik juga selalu lebih tinggi, hal ini disebabkan oleh sifat dari katalis yang memiliki kelembaban kalor yang tinggi sehingga panas per satuan luas *top burner* yang dihasilkan menjadi lebih besar. Kebalikan dengan efisiensi, dengan bertambahnya laju alir bahan bakar, maka waktu pembakaran yang dibutuhkan menjadi semakin kecil (Gambar 4.11). Hal ini karena pada laju bahan bakar yang tinggi, temperatur pembakaran menjadi lebih tinggi dan ukuran nyala menjadi lebih besar, tetapi tidak berarti semakin kecil waktu pembakaran otomatis efisiensi akan menjadi semakin besar karena harus dipertimbangkan juga berapa banyak kalor yang disuplay bahan bakar dapat diserap oleh media yang dipanasi.



Gambar 4.11 Pengaruh laju alir bahan bakar terhadap waktu pemasakan

4.5.3. Komparasi *top burner* katalitik dengan non katalitik dan *port* konvensional

Dari hasil penelitian yang ditampilkan pada Tabel 4.6, diperlihatkan bahwa, *top burner* yang dilapisi katalis LaCrO_3 mampu meningkatkan efisiensi menjadi 70,06 dari 45,42 (naik 24,64 %) pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit hal ini disebabkan dua hal yaitu, pertama karena pengaruh dari geometri *top burner* yang menghasilkan hanya satu nyala sehingga *heat loss* ke lingkungan dapat diperkecil dibandingkan dengan *port* konvensional yang memiliki nyala menyebar. Kedua karena efek katalitik yang memiliki kelembaban kalor yang tinggi sehingga panas per satuan luas *top burner* yang dihasilkan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan *top burner* tanpa dilapisi katalis, ini juga dapat

dilihat dari Tabel 4.6 dengan dilapisi katalis efisiensi termal kompor gas meningkat dari 66,67 menjadi 70,06 atau naik 3,39 %.

Tabel 4.6 Komparasi antar top burner katalitik dengan non katalitik dan port konvensional

Laju alir bahan bakar (ml/men)	Efisiensi Termal (%)				
	konvensional	Bunsen + TB tnp katalis	Bunsen + TB LaMnO ₃	Bunsen + TB LaCrO ₃	Bunsen + TB LaCoO ₃
700	48,805	68,366	66,794	71,021	70,449
900	47,059	73,798	76,672	74,873	74,516
1100	43,423	64,284	71,040	67,431	67,380
1300	42,388	60,243	63,473	66,929	64,791
Rata-rata	45,42	66,67	69,49	70,06	69,28
Peningkatan ^a		21,25	24,08	24,64	23,87
Peningkatan ^b			2,82	3,39	2,61

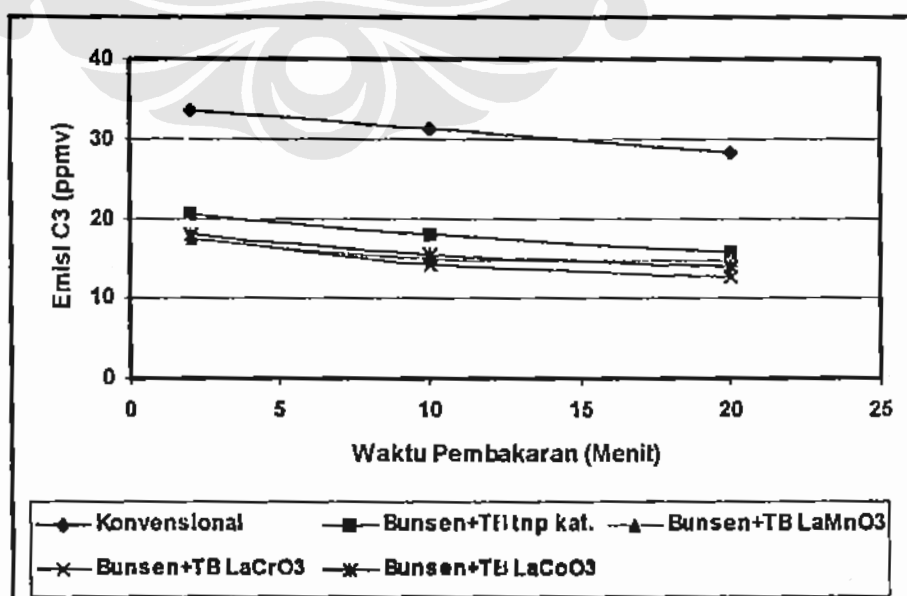
^a Relatif terhadap kompor konvensional

^b Relatif terhadap Top Burner tanpa katalis

4.6. KONSENTRASI KOMPONEN GAS BUANG

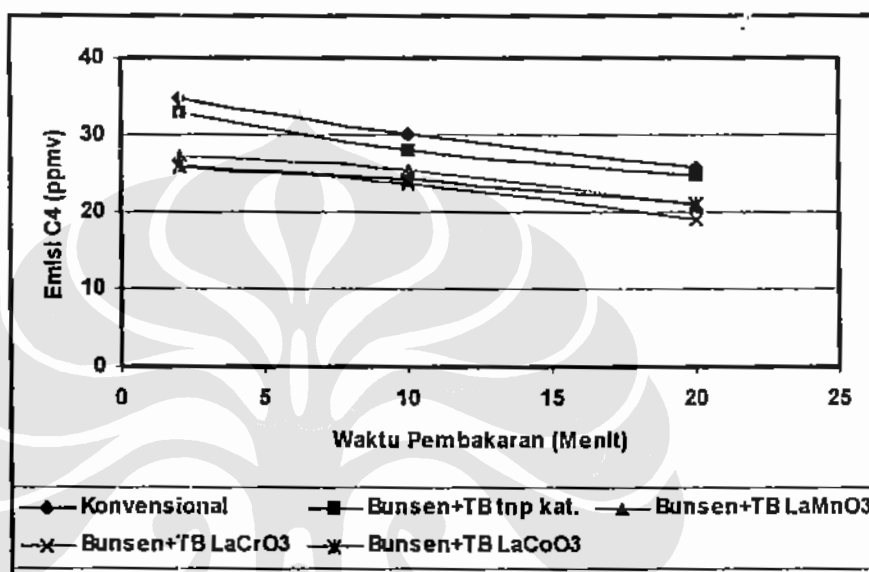
4.6.1. Pengaruh Waktu Pembakaran

Untuk mencapai reaksi pembakaran sempurna, dibutuhkan waktu tertentu, perbandingan relatif udara bahan bakar tertentu, serta orientasi nyala api pembakaran. Gas buang hasil pembakaran yang akan dipelajari pada penelitian ini berupa, CO, NO_x, CO₂, C₃ dan C₄.

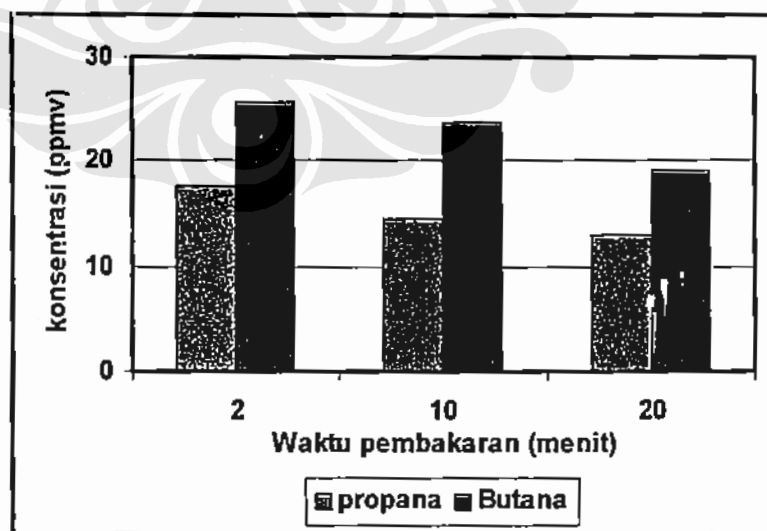


Gambar 4.12 Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi C₃ pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit

Dengan bertambahnya waktu pembakaran maka konsentrasi emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) akan semakin berkurang baik untuk pembakaran katalitik maupun non-katalitik, seperti diperlihatkan pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13. Hal ini terjadi karena dengan bertambahnya waktu pembakaran pencampuran udara bahan bakar menjadi lebih homogen sehingga lebih banyak bahan bakar yang terkonversi.



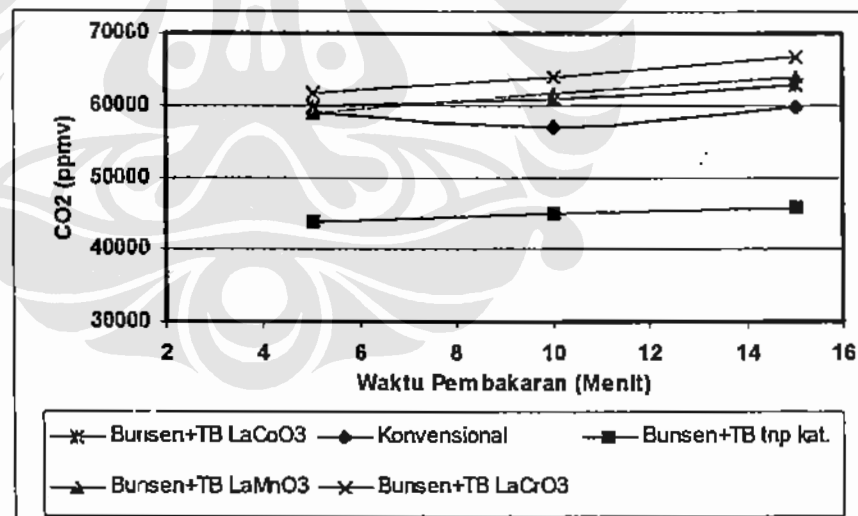
Gambar 4.13 Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi C₄ pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit



Gambar 4.14 Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi C₃ dan C₄ pada laju alir bahan bakar 900 ml/menit untuk *top burner* LaCrO₃

demikian juga untuk jenis katalis yang lain dan untuk pembakaran non-katalitik. Hal ini karena butana mempunyai tekanan uap jenuh lebih kecil (224,06 kPa) dibandingkan dengan tekanan uap jenuh propana (941,07 kPa) sehingga propana lebih mudah menguap dibandingkan dengan butana, selain itu energi ikat butana lebih besar dibandingkan dengan propana.

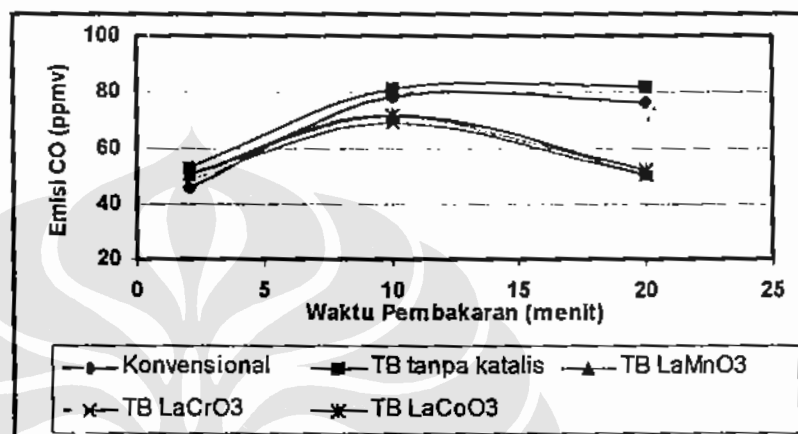
Konsentrasi rata-rata UHC pada burner konvensional lebih besar dibandingkan dengan top burner tanpa katalis dan top burner yang dilapisi katalis. Tetapi jika dibandingkan dengan top burner tanpa katalis, top burner yang dilapisi katalis mampu mereduksi UHC lebih banyak. Ini membuktikan bahwa adanya efek katalitik dari katalis pada top burner menyebabkan bahan bakar terkonversi lebih banyak sebagai akibat turunnya energi aktivasi reaksi. Sedangkan diantara ketiga jenis katalis yang digunakan, katalis jenis LaCrO_3 memberikan kinerja lebih baik dibandingkan dengan katalis LaMnO_3 dan LaCoO_3 hal ini karena katalis LaCrO_3 mempunyai luas permukaan yang lebih besar, sehingga kontak antara bahan bakar dengan udara di atas permukaan katalis menjadi semakin banyak.



Gambar 4.15 Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi CO_2 laju alir bahan bakar 1300 ml/menit

Dengan bertambahnya waktu pembakaran maka konsentrasi UHC akan turun, sebaliknya terjadi pada CO_2 , dengan bertambahnya waktu pembakaran konsentrasi CO_2 akan semakin bertambah karena semakin lama pencampuran bahan bakar dengan udara semakin baik. Kecuali yang terjadi pada burner konvensional, pada menit ke 10 terjadi penurunan konsentrasi CO_2 , hal ini bisa saja terjadi karena nyala api mengalami *blow off*,

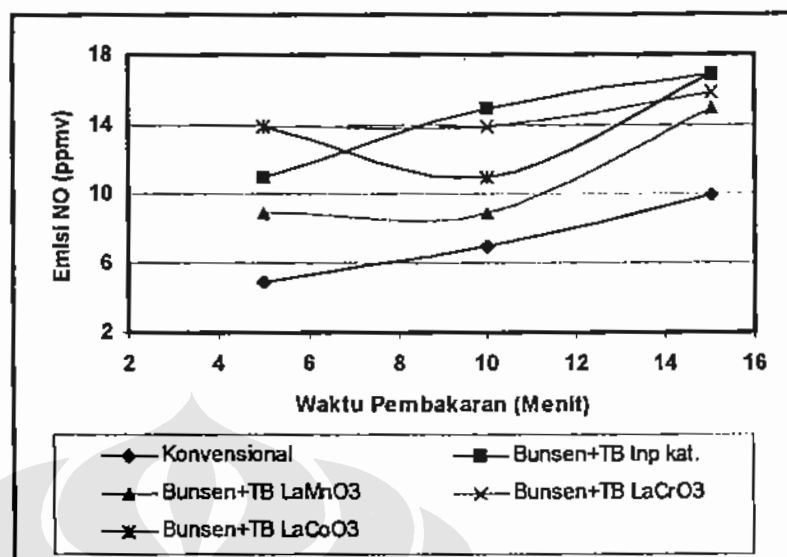
sehingga reaksi pembakaran terganggu akibatnya hasil reaksi tidak konsisten. Blow off sering terjadi pada reaksi pembakaran pada kondisi *fuel rich* sehingga 'aju bahan bakar lebih besar dari laju nyala. Penyebab lain *blow off* adalah kekurangan suplay oksigen. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.16 Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi CO laju alir bahan bakar 1300 ml/menit

Pada Gambar 4.16 diperlihatkan bahwa, pada awal pembakaran hingga menit ke 10 konsentrasi CO cenderung meningkat, hal ini disebabkan pada awal pembakaran reaksi yang terjadi adalah reaksi oksidasi parsial yang terjadi karena belum sempurnanya pencampuran bahan bakar dengan udara disamping itu bisa juga disebabkan karena belum tercapainya temperatur untuk reaksi oksidasi total.

Untuk top burner katalitik, oksidasi parsial dapat terjadi selain karena hal yang disebutkan di atas juga dapat disebabkan karena belum tercapainya temperatur reaktivitas katalis yaitu sekitar 550°C (Zwinkel, 99). Efek katalitik mulai terlihat pada menit ke 11 dimana konsentrasi CO untuk semua jenis katalis lebih rendah dibandingkan dengan burner konvensional.



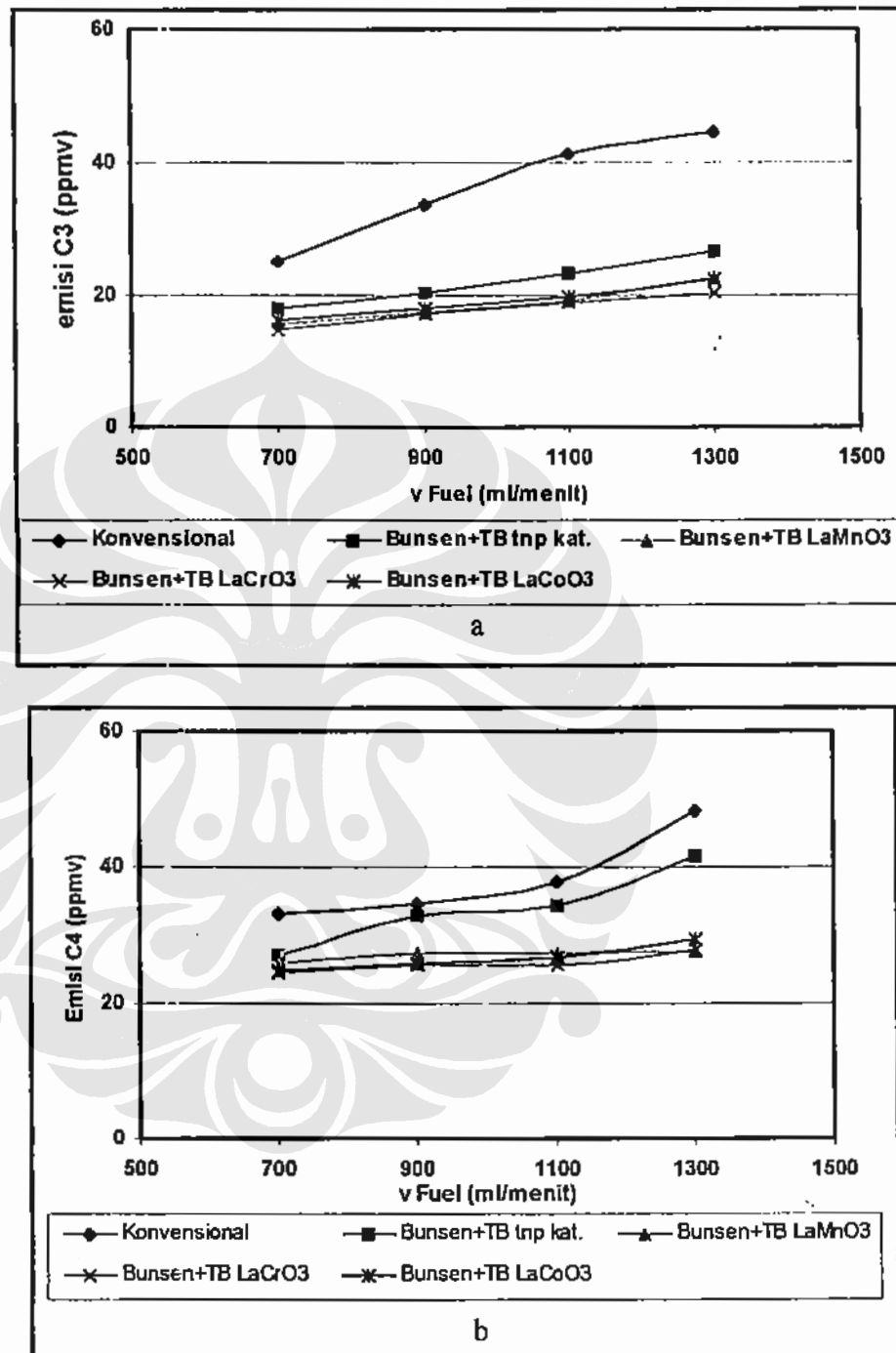
Gambar 4.17 Pengaruh waktu pembakaran terhadap emisi NO laju alir bahan bakar 1300 ml/menit

Pada Gambar 4.17 terlihat bahwa konsentrasi NO mengalami kenaikan dan penurunan dengan bertambahnya waktu pembakaran untuk jenis burner yang berbeda. Sesuai Gambar 4.21, apabila suhu nyala tinggi maka NO yang dihasilkan juga akan tinggi. Namun demikian kenaikan dan penurunan emisi NO tidak terlalu signifikan. Emisi NO paling tinggi terjadi pada top burner tanpa katalis yaitu sebesar 17 ppm pada menit ke 15 dan paling rendah terjadi pada burner konvensional yaitu sebesar 10 ppm juga pada menit yang sama.

4.6.2. Pengaruh Laju Bahan Bakar

Dari Gambar 4.18 di bawah ini, dapat dilihat bahwa konsentrasi C_3 dan C_4 mengalami kenaikan dari laju alir bahan bakar 700 ml/menit sampai laju alir 1300 ml/menit. Hal ini karena semakin tinggi laju alir maka kondisi pembakaran akan semakin *rich* (kaya bahan bakar) sementara suplay udara sekunder selama proses pembakaran tidak mencukupi sehingga emisi UHC juga akan meningkat.

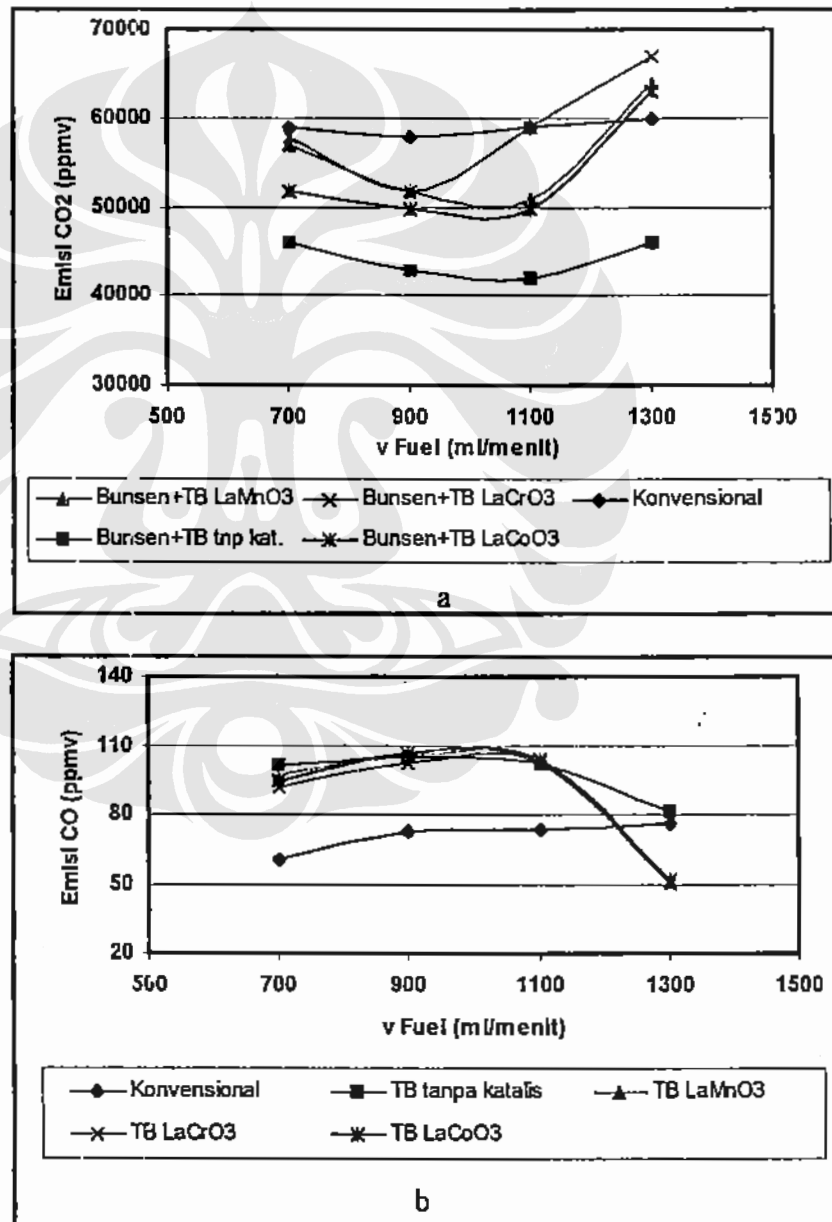
Pengaruh pelapisan katalis di atas permukaan *top burner* terlihat cukup signifikan dalam mereduksi UHC yang dihasilkan. Dibandingkan dengan burner konvensional, top burner yang dilapisi katalis $LaCrO_3$ mampu mereduksi emisi UHC paling tinggi.



Gambar 4.18 Pengaruh laju bahan bakar terhadap (a) emisi C₃, (b) emisi C₄ pada menit ke-10

Konsentrasi CO₂ mengalami penurunan dengan meningkatnya laju alir bahan bakar dari 700 sampai 1100 ml/menit kemudian naik kembali dengan naiknya laju alir sampai 1300 ml/menit, ini kebalikan dengan konsentrasi UHC. Konsentrasi CO₂ paling rendah tiap jenis burner dihasilkan pada laju alir bahan bakar 1100 ml/menit sementara konsentrasi CO, UHC dan partikel karbon banyak terbentuk, sementara pada laju alir bahan bakar 1300

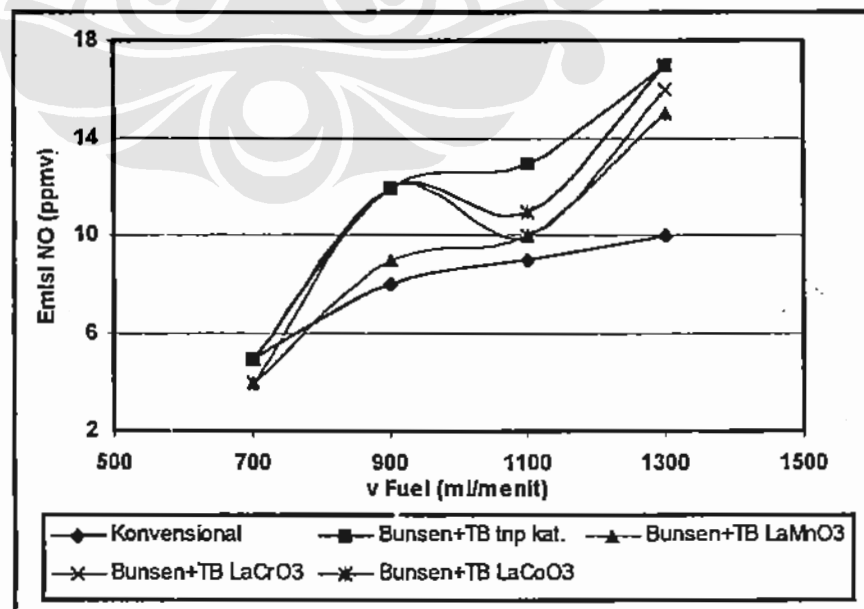
konsentrasi CO_2 mengalami kenaikan. Hal ini bisa saja disebabkan karena turbulensi nyala api yang terjadi karena pengaruh suplay udara sekunder. Dari Gambar 4.19 secara umum dapat dilihat bahwa konsentrasi CO merupakan kebalikan dari konsentrasi CO_2 . Hal ini tidak bertentangan dengan teori yang mengatakan bahwa sumber terbentuknya CO adalah kondisi pembakaran *rich* (kekurangan udara) dimana pembakaran yang terjadi tidak berlangsung cepat sehingga mendorong terbentuknya CO lebih banyak.



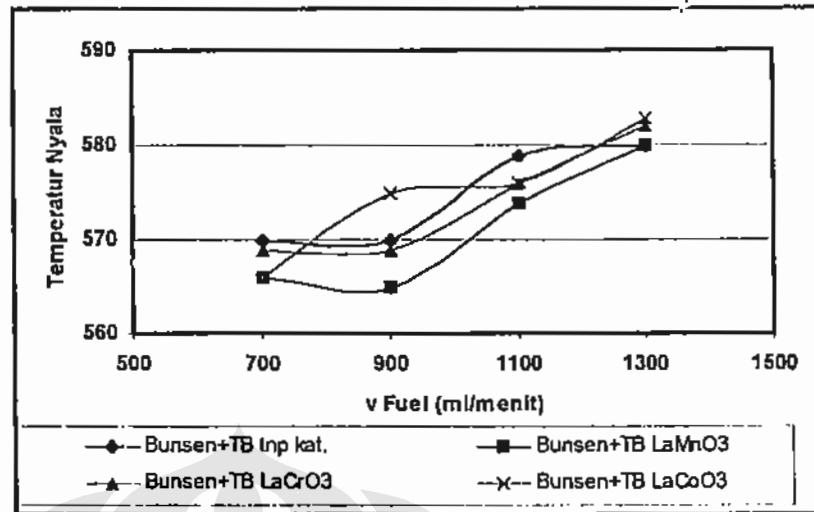
Gambar 4.19 Pengaruh laju bahan bakar terhadap (a) emisi CO_2 menit ke-15, (b) emisi CO pada menit ke-20

Jika dibandingkan dengan pembakaran non katalitik (burner konvensional dan top burner tanpa dilapisi katalis), *top burner* yang dilapisi katalis mampu mengkonversi bahan bakar lebih sempurna hanya pada laju bahan bakar 1300 ml/menit dan pada menit ke 20, ini terlihat dari konsentrasi CO_2 yang dihasilkan lebih tinggi sementara konsentrasi CO lebih rendah. Tetapi pada menit-menit awal pembakaran dan pada laju bahan bakar lebih kecil dari 1100 ml/menit, burner konvensional menghasilkan emisi CO yang paling rendah dan emisi CO_2 paling tinggi. Sementara diantara ketiga jenis katalis yang digunakan, katalis tipe LaCrO_3 memperlihatkan kinerja lebih baik dibandingkan dengan LaMnO_3 dan LaCoO_3 .

Sedangkan pada Gambar 4.20 dan 4.21 konsentrasi NO lebih banyak dipengaruhi oleh temperatur nyala, kandungan nitrogen dan oksigen dalam udara serta kondisi pencampuran bahan bakar. Apabila temperatur nyala pembakaran tinggi, kandungan oksigen dan nitrogen dalam nyala pembakaran tinggi maka konsentrasi NO yang dihasilkan juga akan tinggi dan sebaliknya. Masing-masing jenis burner yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kecenderungan meningkat yang hampir sama kecuali untuk burner konvensional yang hampir tidak ada perbedaan antara laju alir yang satu dengan yang lain dalam konsentrasi NO yang dihasilkan. Pada burner konvensional, temperatur nyala tidak terdeteksi dengan *pyrometer* sehingga tidak dapat dilihat pengaruhnya terhadap konsentrasi NO seperti pada Gambar 4.21.



Gambar 4.20 Pengaruh laju bahan bakar terhadap NO menit ke-15



Gambar 4.21 Pengaruh T nyala terhadap konsentrasi NO fungsi dari laju alir pada menit ke-15

4.6.3. Faktor Faktor Emisi

Faktor emisi adalah perbandingan antara gram polutan terhadap kilogram bahan bakar yang dikonsumsi selama proses pembakaran. Untuk menentukan faktor-faktor emisi digunakan metode *carbon balance* (Smith et al.,1992). Metode perhitungan yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran D. Selama pembakaran, karbon yang terdapat dalam bahan bakar terutama akan keluar sebagai gas CO_2 , CO dan *Unburned Hydrocarbon* (UHC). Faktor-faktor emisi yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut ini

Tabel 4.7 Faktor-faktor Emisi

BURNER	700 ml/menit			900 ml/menit			1100 ml/menit			1300 ml/menit		
	Faktor Emisi, Efbc			Faktor Emisi, Efbc			Faktor Emisi, Efbc			Faktor Emisi, Efbc		
	g/kg			g/kg			g/kg			g/kg		
	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2
Konvensional	11,94	15,3	16218	13,6	14,2	12619	11,3	12,9	10300	12,1	9,9	8726
TB tanpa katalis	17,25	33	16208	13,9	26,9	12606	12,8	26,8	10284	9,5	10,7	8728
TB LaMnO3	10,7	22	16216	10,4	22,9	12614	8,7	19,8	10296	6,6	8,21	8733
TB LaCrO3	10	21	16217	8,9	20,6	12617	7	16,5	10301	6,1	7,6	8735
TB LaCoO3	10,9	22	16216	10	22,4	12615	9,7	23,1	10291	6,7	7,97	8734

Faktor-faktor emisi ini berguna untuk menentukan *GHG Inventory* (EPA, 2000). Dari Tabel 4.7 terlihat bahwa emisi UHC paling rendah dihasilkan pada Top Burner yang dilapisi katalis $LaCrO_3$ pada laju pembakaran 1300 ml/menit yaitu sebesar 6,1 g/kg, begitu

juga untuk emisi CO yaitu sebesar 7,6 g/kg, sedangkan untuk emisi CO₂ paling tinggi dihasilkan pada kompor konvensional pada laju 700 ml/menit yaitu sebesar 16218 g/kg.

4.6.4. Komparasi *top burner* katalitik dengan non katalitik dan *port* konvensional

Dari penelitian yang telah dilakukan seperti disajikan dalam Tabel 4.8 – 4.12, pelapisan katalis di atas permukaan *top burner* mampu menurunkan emisi C₃ 14,04 – 16,97 ppmv (38,65% - 46,71 %), C₄ turun antara 5 – 11,8 ppmv (11,86 % - 30,50 %), sedangkan CO mengalami naik berkisar antara 13,09-16,09 ppmv (29,08 % – 35,75 %), dan NO mengalami kenaikan antara 2,8 – 4,5 ppmv dan CO₂ mengalami penurunan antara 3000 – 6250 ppmv (5,1% - 8,9 %).

Reduksi emisi C₃ dan C₄ paling tinggi terjadi pada *top burner* yang dilapisi katalis LaCrO₃ yaitu 50,23 % dan 32,66 % sedangkan dua jenis katalis lainnya yaitu LaMnO₃ mereduksi C₃ dan C₄ sebesar 47,74 % dan 29,79 %; LaCoO₃ 46,71 % dan 30,50 %.

Tabel 4.8 Reduksi Emisi C₃ (ppmv)

Top Bumer	Laju Alir Gas (ml/menit)				Rata-rata	Red. (ppmv)	Red. (%)
	700	900	1100	1300			
Konvensional	25	34	41	45	36,33		
Bunsen+TB tnp katalis	18	21	24	27	22,29	14,04	38,65
Bunsen+TB LaMnO ₃	16	18	20	23	18,99	17,34	47,74
Bunsen+TB LaCrO ₃	15	17	19	21	18,08	18,25	50,23
Bunsen+TB LaCoO ₃	17	18	20	23	19,36	16,97	46,71

Tabel 4.9 Reduksi Emisi C₄

Top Bumer	Laju Alir Gas (ml/menit)				Rata-rata	Red (ppmv)	Red (%)
	700	900	1100	1300			
Konvensional	33	35	38	49	38,74		
Bunsen+TB tnp katalis	27	33	34	42	34,15	5	11,36
Bunsen+TB LaMnO ₃	26	27	28	28	27,20	11,54	29,79
Bunsen+TB LaCrO ₃	25	26	26	28	26,09	12,65	32,66
Bunsen+TB LaCoO ₃	25	26	27	30	26,92	11,82	30,50

Jika dibandingkan dengan pembakaran kompor konvensional, pembakaran katalitik belum mampu mereduksi emisi CO, untuk selanjutnya disarankan untuk loading yang lebih

tinggi dari 2%, namun demikian diantara ketiga jenis katalis yang digunakan katalis tipe LaCrO_3 memperlihatkan kinerja paling baik

Tabel 4.10 Reduksi Emisi CO

Top Burner	Laju Alir Gas (ml/menit)				Rata-rata	Red. (ppmv)	Red. (%)
	700	900	1100	1300			
Konvensional	26	40	67	46	45,00		
Bunsen+TB tnp katalis	76	66	107	53	75,68	-30,68	-68,18
Bunsen+TB LaMnO_3	48	66	76	50	60,12	-15,12	-33,60
Bunsen+TB LaCrO_3	47	62	75	49	58,09	-13,09	-29,08
Bunsen+TB LaCoO_3	49	66	79	51	61,09	-16,09	-35,75

Modifikasi burner bunsen di tambah *top burner* di atasnya menyebabkan kenaikan temperatur nyala sehingga konsentrasi NO naik dengan kenaikan temperatur nyala. Kenaikan konsentrasi tertinggi NO diperoleh pada *top burner* yang dilapisi katalis LaCrO_3 dan LaCoO_3 yang mengalami kenaikan 4,5 ppmv (128,6 %) kemudian LaMnO_3 sebesar 2,8 ppmv (78,6 %) seperti diperlihatkan pada Tabel 4.9

Tabel 4.11 Reduksi Emisi NO

Burner	Laju alir bahan bakar (ml/menit)				Rata-rata	naik (ppmv)	naik (%)
	700	900	1100	1300			
Konvensional	4	3	3	4	3,5		
Bunsen+TB tnp kat.	9	8	8	11	9,0	5,5	157,1
Bunsen+TB LaMnO_3	7	4	5	9	6,3	2,8	78,6
Bunsen+TB LaCrO_3	6	5	7	14	8,0	4,5	128,6
Bunsen+TB LaCoO_3	5	6	7	14	8,0	4,5	128,6

Jika dengan pembakaran katalitik terjadi kenaikan emisi CO hal yang sebaliknya terjadi pada konsentrasi CO_2 yang mengalami penurunan, ini menunjukkan bahwa proses pembakaran bahan bakar belum berlangsung lebih baik dibandingkan dengan pembakaran konvensional. Namun demikian, konsentrasi CO_2 yang diperoleh pada pada pembakaran *top burner* yang dilapisi katalis LaCrO_3 sama dengan yang dihasilkan oleh pembakaran

Tabel 4.12 Kenaikan Emisi CO₂

Burner	Laju alir bahan bakar (ml/menit)				Rata-rata	turun (ppmv)	turun (%)
	700	900	1100	1300			
Konvensional	59000	58000	59000	60000	59000		
Bunsen+TB tnp kat.	46000	43000	42000	46000	44250	-14750	
Bunsen+TB LaMnO ₃	57000	52000	51000	64000	56000	-3000	-5,1
Bunsen+TB LaCrO ₃	58000	52000	59000	67000	59000	0	0,0
Bunsen+TB LaCoO ₃	52000	50000	50000	63000	53750	-5250	-8,9

Dari Tabel 4.8 dan 4.9 untuk *top burner* katalitik, terlihat bahwa emisi C₃ dan C₄ mengalami penurunan relatif terhadap kompor konvensional antara 16,97 – 18,25 ppm dan 11,54 – 12,65 ppm, sementara pada Tabel 4.10 terlihat bahwa emisi CO naik antara 13,09 – 16,09 ppm, dan pada Tabel 4.12 emisi CO₂ turun antara 0 – 5250 ppm. Kalau diperhatikan, penurunan emisi CO₂ dan UHC untuk *top burner* katalitik tidak dapat diimbangi oleh kenaikan emisi CO. Padahal dengan melihat neraca karbon, bahwa karbon yang terdapat di dalam bahan bakar akan berubah menjadi CO, CO₂ dan UHC, jelas menjadi tidak seimbang. Untuk mengimbangi penurunan emisi CO₂ dan UHC tersebut, disamping terjadi kenaikan emisi CO juga diperkirakan sebagian karbon dalam bahan bakar akan membentuk deposit karbon berupa jelaga yang dapat diamati pada lapisan bawah teko yang digunakan. Sayangnya pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran terhadap deposit karbon yang terbentuk.



BAB V

KESIMPULAN

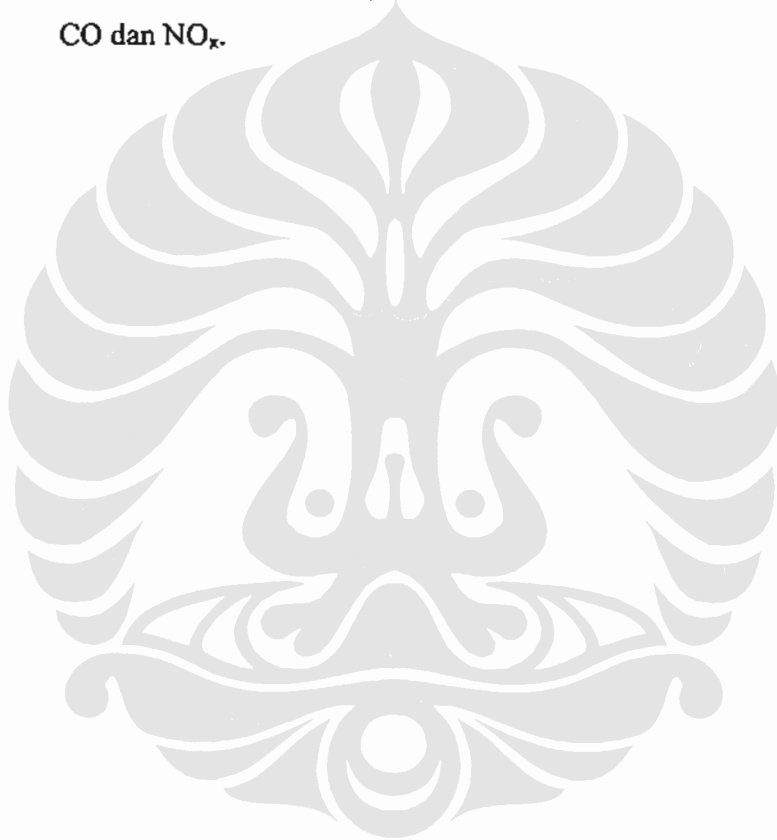
BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pelapisan *top burner* dari bahan *stainless steel* (AISI 301) dengan katalis LaMnO_3 , LaCrO_3 , LaCoO_3 dengan metode pencelupan berulang sebanyak tiga kali dan suhu kalsinasi 900°C menghasilkan *loading* berkisar antara 2 – 2,01 % (w/w) dan ketebalan lapisan 26 – 29 μm . Lapisan katalis yang dihasilkan sudah cukup tebal, sayangnya adhesivitas lapisan katalis tidak cukup kuat, dari hasil analisa SEM terlihat permukaan lapisan yang retak-retak dan setelah ditimbang kembali *top burner* yang sudah digunakan ternyata mengalami penurunan *loading* 16-17 % (w/w).
2. Dari aspek efisiensi termal, dibandingkan kompor konvensional pembakaran katalitik mampu meningkatkan efisiensi termal sebesar 19 – 22 %. Efisiensi paling tinggi diperoleh pada katalis LaCrO_3 sebesar 22,15 %, kemudian LaCoO_3 sebesar 21,04 % dan LaMnO_3 19,96 %. Tetapi jika dibandingkan dengan *top burner* yang sama tanpa dilapisi katalis, efisiensi hanya meningkat 5 – 6 % saja.
3. Dari aspek reduksi emisi polutan, efek katalitik pada kompor gas LPG memberikan hasil yang sangat baik untuk emisi UHC. Reduksi emisi C_3 dan C_4 paling tinggi terjadi pada *top burner* yang dilapisi katalis LaCrO_3 yaitu 18,25 ppmv dan 12,65 ppmv (50,23 % dan 32,66 %) dibandingkan dengan dua jenis katalis lainnya yaitu LaMnO_3 mereduksi C_3 dan C_4 sebesar 17,34 ppmv dan 11,54 ppmv (47,74 % dan 29,79 %); LaCoO_3 16,17 ppmv dan 11,82 ppmv (46,71 % dan 30,50 %). Tetapi *top burner* katalitik belum mampu mereduksi emisi CO dan NO_x sesuai dengan yang diharapkan, emisi CO dan NO_x justru meningkat. Walaupun semua jenis katalis yang digunakan tidak ada yang dapat mereduksi CO, katalis LaCrO_3 tetap memperlihatkan kinerja paling baik dengan hanya meningkatkan emisi CO sebesar 13,09 ppmv (29,08 %) dibandingkan dengan kompor konvensional, sementara katalis LaCoO_3 35,75 % dan LaMnO_3 33,6 %. Demikian juga dengan

emisi NO_x meningkat sebesar 4,5 ppmv (128,6 %) pada *top burner* dilapisi katalis LaCrO_3 dan LaCoO_3 dan LaMnO_3 naik sebesar 2,8 ppmv (78,6 %) . Sementara emisi CO_2 berkebalikan dengan emisi CO yaitu mengalami penurunan 3000 ppmv (5,1 %) untuk katalis LaMnO_3 dan 5250 ppm untuk katalis LaCoO_3 sementara untuk katalis LaCrO_3 sama dengan yang dihasilkan oleh kompor konvensional. Secara umum dapat dikatakan, penambahan lapisan tipis katalis tipe perovskite di atas permukaan *top burner* mampu meningkatkan kinerja gas dalam mereduksi emisi polutan UHC tetapi belum memberikan hasil yang memuaskan untuk emisi CO dan NO_x .



DAFTAR PUSTAKA

1. A. Boehman, *AIChE J* 44, p2745, 1998
2. Adam Bielanski, Jerzy Haber, "Oxygen in catalysis" New York, 1991
3. Ahuja DR, Joshi V, Smith KR, and Ventakataraman C, "Thermal Performance and Emission Characteristics of unvented biomass-burning cookstoves: Aptoposal standard methode for evaluation", 1987
4. Air Polution Control Engineering, International Edition, McGraw-Hill Co. Inc., Singapore, 2000
5. Albert Thumann, P.E., CEM, "Guide to improving efficiency of combustion systems", The Fairmont Press, Inc. 1988
6. Beer, Janos M, Minimizing NO_x Emission From Stationary Combustion: Reaction Engineering Methodology, *Chemical Engineering Science*, Vol 49, No. 24A, p4067-4083, 1994
7. Brandt. C., and Heck, W.W, "Effect of Air Polution on Vegetation" in Air Polution Control Vol 1, New York Academic Press, 1968
8. Brockerhoff, B. Emonts, Use of Natural Gas in a Catalytic Radiant Burner for Low-Emission Heat Production, *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol 107, 1997
9. C. David Cooper, E.C. Alley, " Air Polution Control: A Design Approach", Waveland Press Inc., 1990
10. Crutzen PJ and Andreae, Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biological cycles, *Science* 250, p1669-1678, 1990
11. EPA, "Green House Gases Form Small-Scale Combustion Device In Developing Countries: Phase IIA Houshold Stoves in India", Research and Development, june 2000
12. H. Arai, M. Machida, *Appl. Catal* 138, p161, 1996
13. H. Arai, M. T. Yamada. K. Eguchi, T. Seyuma, *Appl. Catal.* 26, p265, 1989
14. H. Sadamori, Application concepts and evaluation of small-scale catalytic combustors for natural gas, *Catal. Today*, 47, p.325-338, 1999
15. H. Sadamori, Application concepts and evaluation of small-scale catalytic combustors for natural gas, *Catal. Today*, 47, p.325-338, 1999
16. <http://www.catalyticcsys.com/catal%20comb.htm>
17. <http://www.catalyticcsys.com/catburner%20.htm>

18. <http://www.mse.vt.edu/faculty/hendricks/mse4206/projects97/group01/solid-state/perovskite.htm>
19. Irvin Glassman, "Combustion", Third Edition, Academic Press, 1996
20. Isota Cerri, Guido Saracco, Francesco Geobaldo, and Vito Specchia, Development of a methane premixed catalytic burner for household application, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, p24-33, 2000
21. J.M. Smith, H.C. Van Ness, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", Fourth Edition, McGraw-Hill, 1987
22. James T. Richardson, "Principles of Catalyst Development", Plenum Press, New York and London, 1989
23. M. Tabata, The Strategies of Development for gas cooking appliances at Osaka gas, *Proceeding of R&D Forum '96 Osaka*, Japan
24. M.G. Hocking, V. Vasantasree, and P.S. Sidky, "Metallic & Ceramic Coatings: Production, High Temperature Properties & Application", John Wiley & Sons, Inc. New York, 1989
25. Nayestakani A.K., Catalytic Combustion of Propane over Pt and Cu modified ZSM-5 zeolite catalyst, *Fuel*, vol 74
26. P. Brockerhoff, B. Emonts, Use natural gas in catalytic radiant burner for low-emission heat production, *Natural Gas Conversion IV, Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol 107, 1997
27. P. Reyes, M. Morales, G. Pecchi, *Bol.Soc. Chil. Quim.*, 41 p 105 (1991)
28. Research and Development, "Greenhouse Gas from Small-Scale Combustion Devices in Developing Countries: Phase IIA, household stoves in India", EPA-600/R-00-052, June 2000
29. Richard M. Felder, Ronald W. Rousseau, "Elementary Principles of Chemical Processes", Second edition, John Wiley & Sons
30. Seong-Soo Hong, Gun-Dae Lee, Simultaneous removal of NO and CO over Lanthanoid perovskite-type catalysts, *Catalysis Today* 63, p297-404, 2000
31. Stefano Cimino, Almerinda Di Benedetto, Raffaele Pirone, Gennaro Russo, Transient behaviour of perovskite-based monolithic reactors in the catalytic combustion of methane, *Catalysis Today* 69, p95-103, 2001
32. Stokinger, H.E., and Coffin, D.L., "Biologic Effects of Air Pollution" in Air Pollution Vol 1, New York Academic Press, 1968

33. T. Lopez, A. Romero, R. Gomez, *Non-Cryst. Solid* 127, p105 (1991)
34. Turns, Stephen R., "An Introduction to Combustion: Concept and Application", McGraw-Hill, 1996
35. U.S. Patent No. 5,939,354, "Perovskite type metal oxide compounds and method for preparing the compounds", aug, 17, 1999
36. Vailant, Sonhi Ro., Catalytic Combustion In A Domestic Natural Gas Burner, *Catalysis Today*, 47, p415-420, 1999
37. Vandever, F.E., and George C. Segeter, "Combustion of gas", Gas Engineering Handbook, Ch.5, The Industrial Press, 1965
38. VITA, "Testing the efficiency of Wood-burning Cookstoves: International Standards", 1985
39. Vitali V. Lissiansky, Vladimir M. Zamansky, Peter M. Maly, Effect of Metal-Containing Additives on Nox Reduction in Combustion and Reburning, *Combustion and Flame* 125, p1118-1127, 2001
40. W.C. Pfefferle, "The Catalytic Combustor : an approach to cleaner combustion, *J. Energy* 2, No. 3, p.142-146, 1978
41. W.J. Kuper, M. Blaauw, F. van der Berg, G.H. Graaf, Catalytic combustion concept for gas turbines, *Catalysis Today* 47, p377-389, 1999
42. W.S. Blazowski, D.E., Walsh, "Catalytic Combustion: An Important Consideration for future application, *Combustion Science and Technology* 10, p233-244.
43. Widodo. W.P, Wungu. G.K, "Kinerja kompor gas katalitik dengan La-Cr-O sebagai katalis", 2000
44. www.solgel.com, H. Schmidt, M. Mennig, "Wet Coating Technologies for glass", November 2000
45. www.solgel.com, William R. Birch "Coating an introduction to the cleaning procedures", june 2000
46. Y. Ono, Y. Fujii, H. Wakita, K. Kimura, T. Inui, catalytic combustion of odors in domestic spaces on ion-exchanged zeolites, *Applied Catalysis B: Environmental*, p227-233, 1998
47. Y. Sudo, A.G.C. Kobussen, NOx measuring methods and emission levels, *Proceeding of 19th World gas conference*, International gas union, Milan, 1994
48. Zwinkels, Marcus, F.M, Haussner O, Menon P.G, Sven G., Jaras, Catalyst Support on $\text{LaAl}_{11}\text{O}_{18}$ Coated Monolith *Catalysis Today* 47, p73-82, 1999



LAMPIRAN A

KALIBRASI

KALIBRASI GC FID SHIMADZU 9A-C-R3A

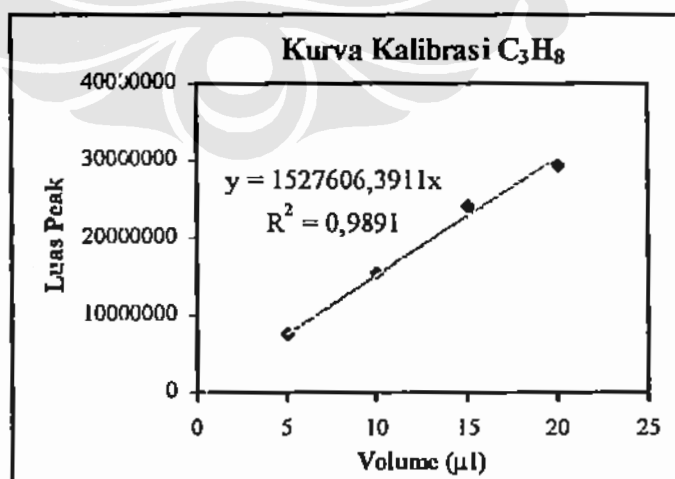
Kondisi Pengoperasian GC :

Jenis Kolom = Porapak Q
 Suhu Kolom = 100°C
 Suhu Injektor = 130°C
 Laju gas carrier (He) = 60 ml/menit

Kalibrasi C_3H_8

Volume (mikroliter)	Luas Peak			Luas Rata-Rata
	1	2	3	
5	7617263	7574972	7434135	7542123,333
10	15578150	15271430	15958176	15602585,33
15	24139570	24401992	24085884	24209148,67
20	29710838	29174198	29439628	29441554,67

Waktu Retensi C_3H_8 : 2.22 – 2.67 menit



KALIBRASI GC FID SHIMADZU 9A-C-R3A

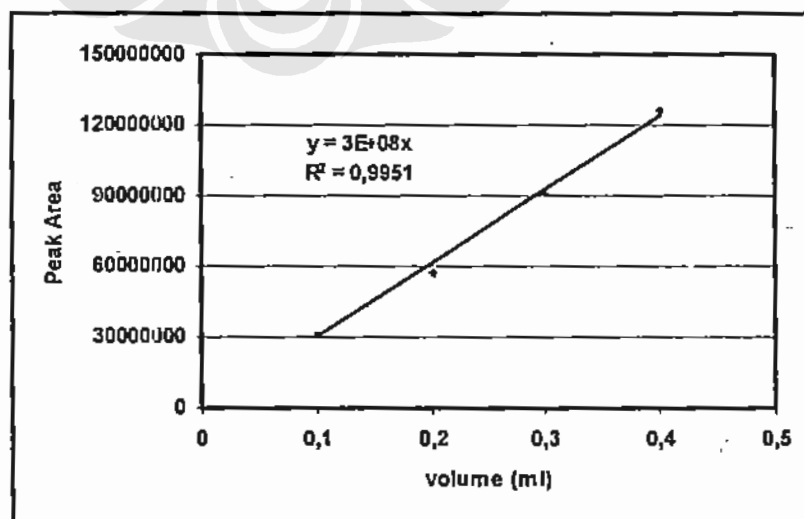
Kondisi Pengoperasian GC :

Jenis Kolom = Porapak Q
 Suhu Kolom = 100°C
 Suhu Injektor = 130°C
 Laju gas carrier (He) = 60 ml/menit

Kalibrasi C_4H_{10}

Volume (mililiter)	Luas Peak			Luas Rata-Rata
	1	2	3	
0,1	30587982	33565472	31256578	31803344
0,2	58635457	59248564	56258795	58047605
0,3	91256895	93565456	90254653	91692335
0,4	118579565	125654785	135687956	126640769

Waktu Retensi C_4H_{10} : 6 – 8 menit

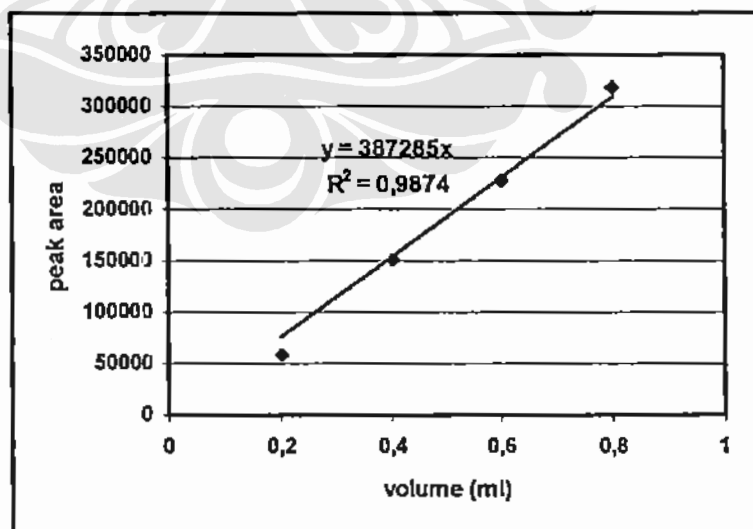


KALIBRASI GC TCD OKHURA 202

Kondisi Pengoperasian GC :

Jenis Kolom = Active Carbon
 Suhu Kolom = 100°C
 Suhu Injektor = 130°C
 Laju gas carrier (Ar) = 60 ml/menit

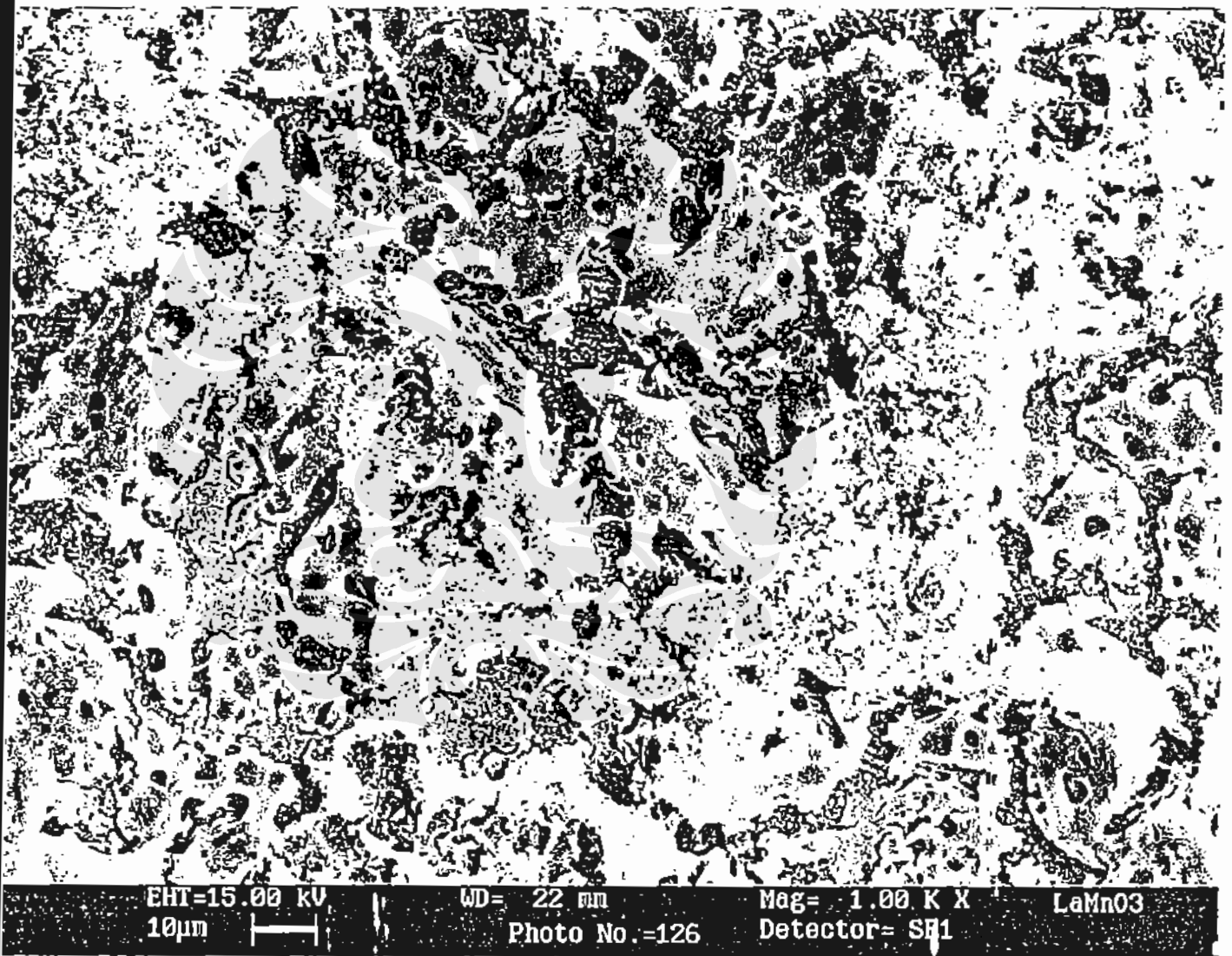
Volume (mililiter)	Luas peak			Luas Rata-Rata
	1	2	3	
0,2	54139	52757	69227	58708
0,4	163575	141336	151625	152179
0,6	231039	233284	219746	228023
0,8	328956	325897	302579	319144

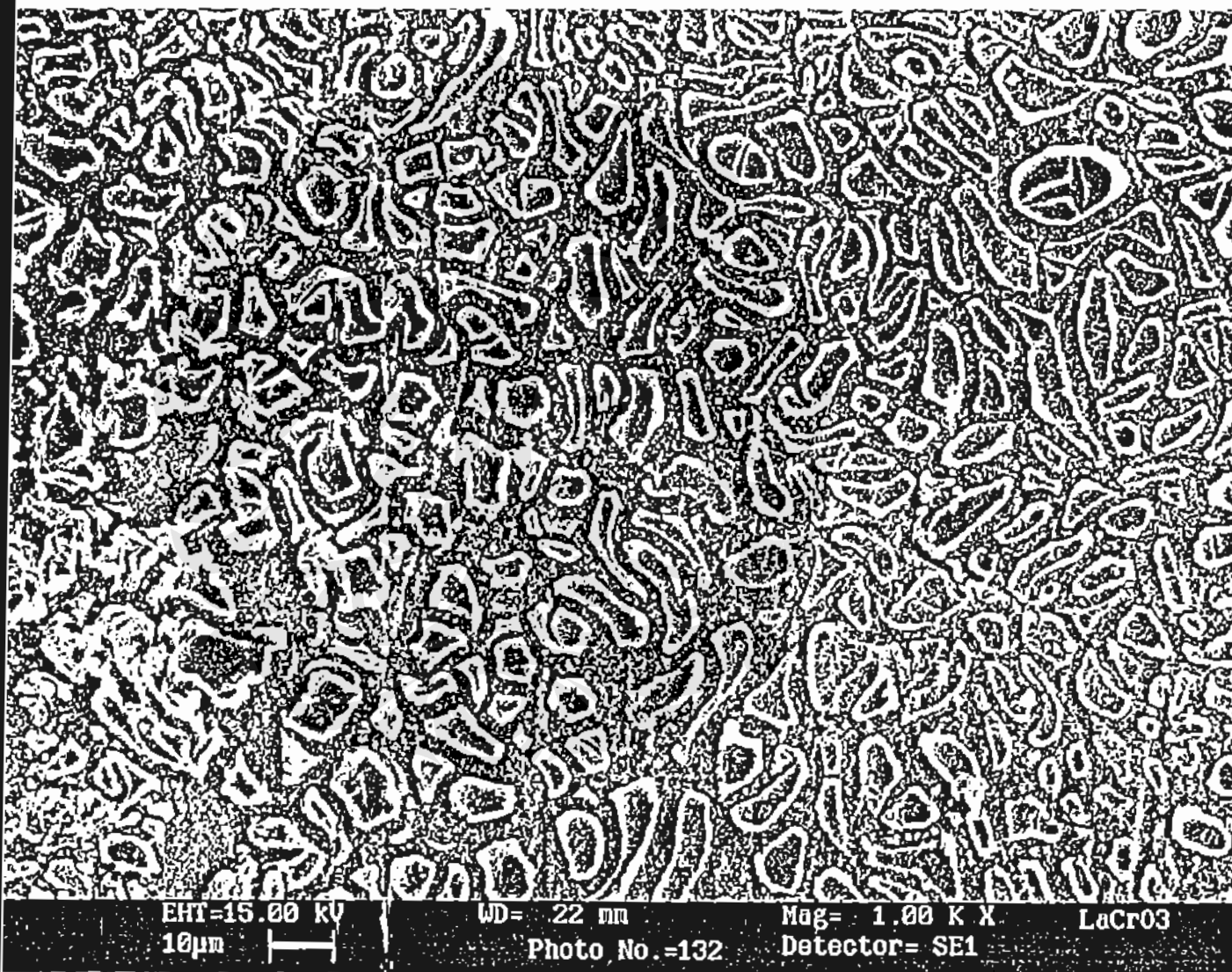


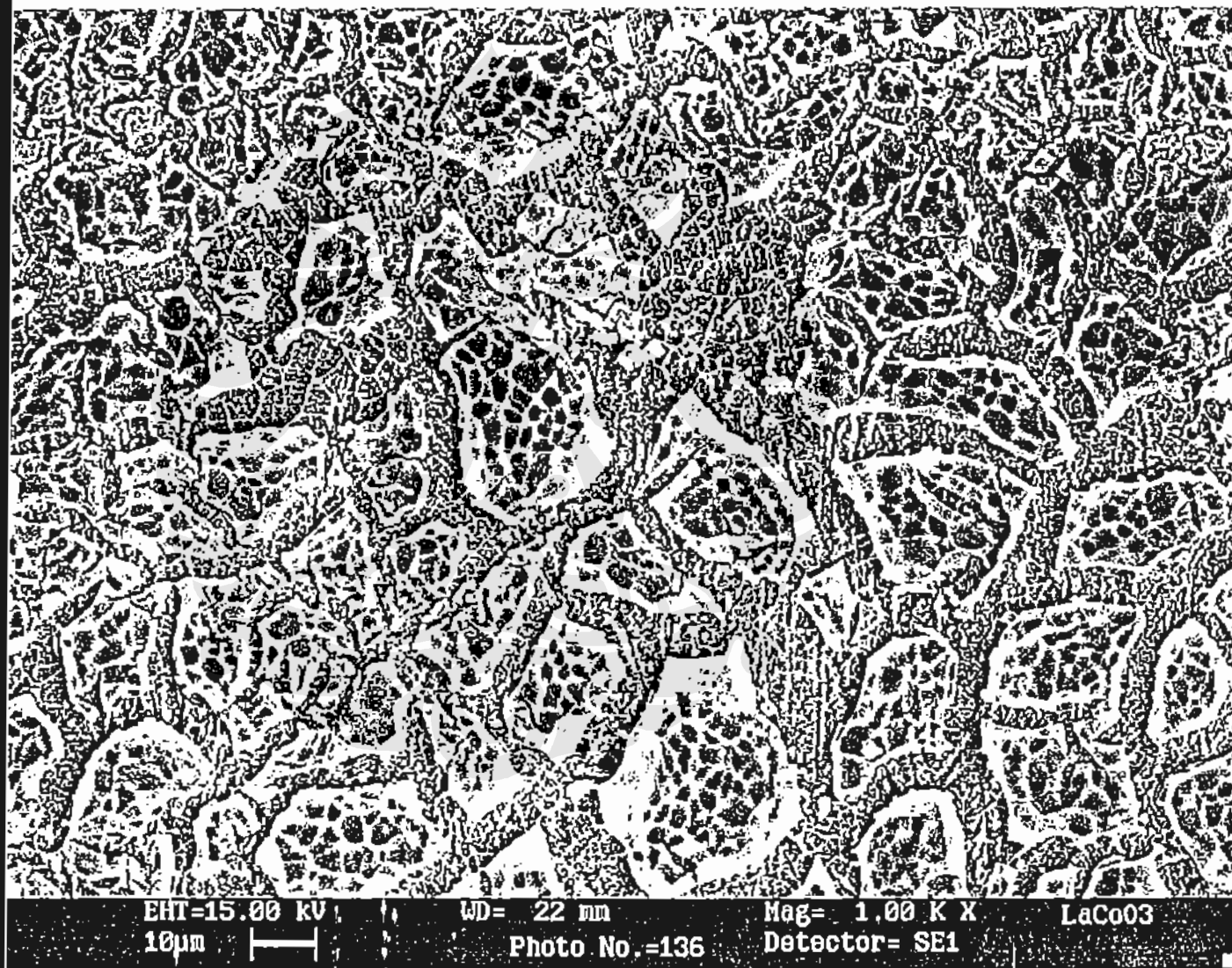


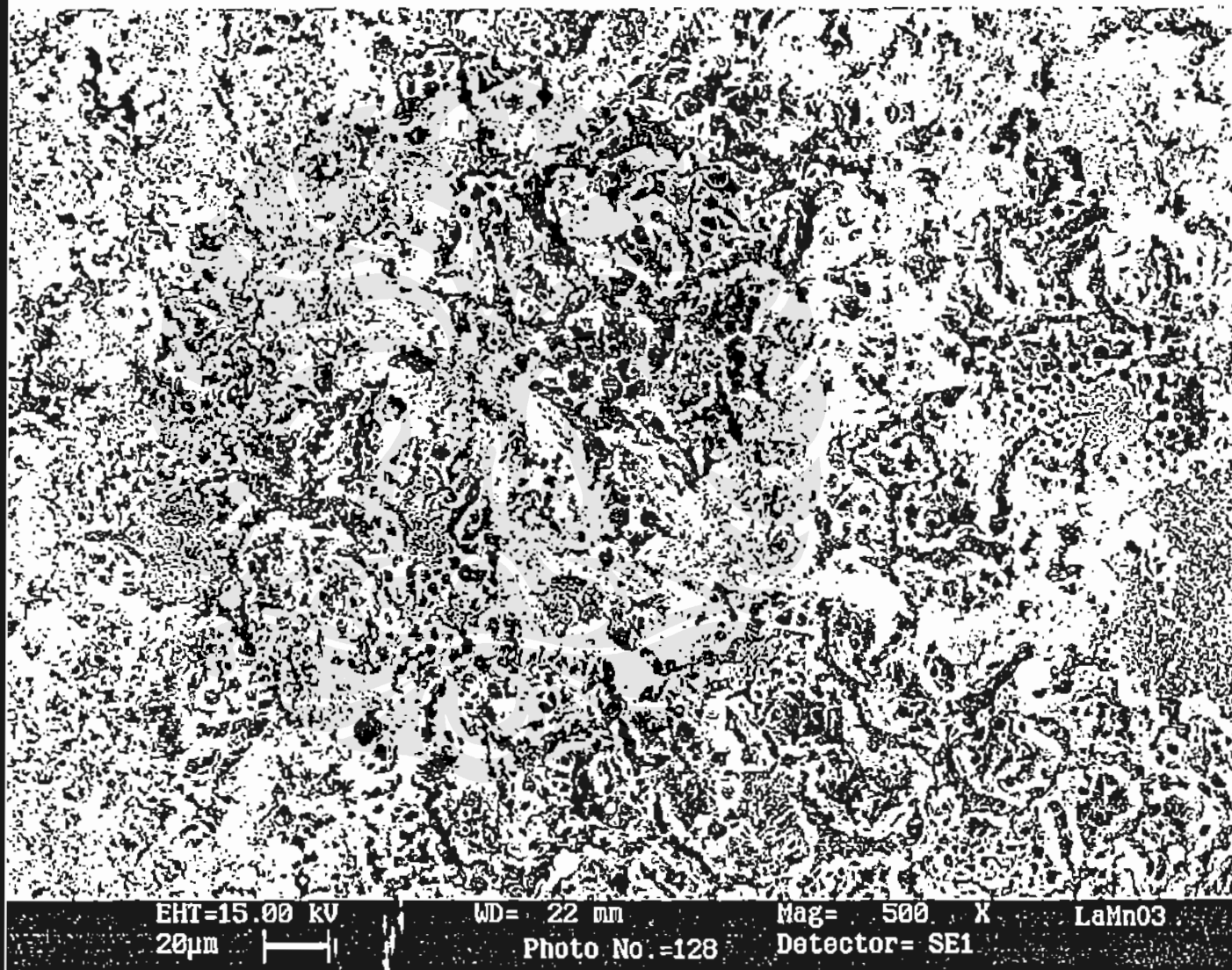
LAMPIRAN B

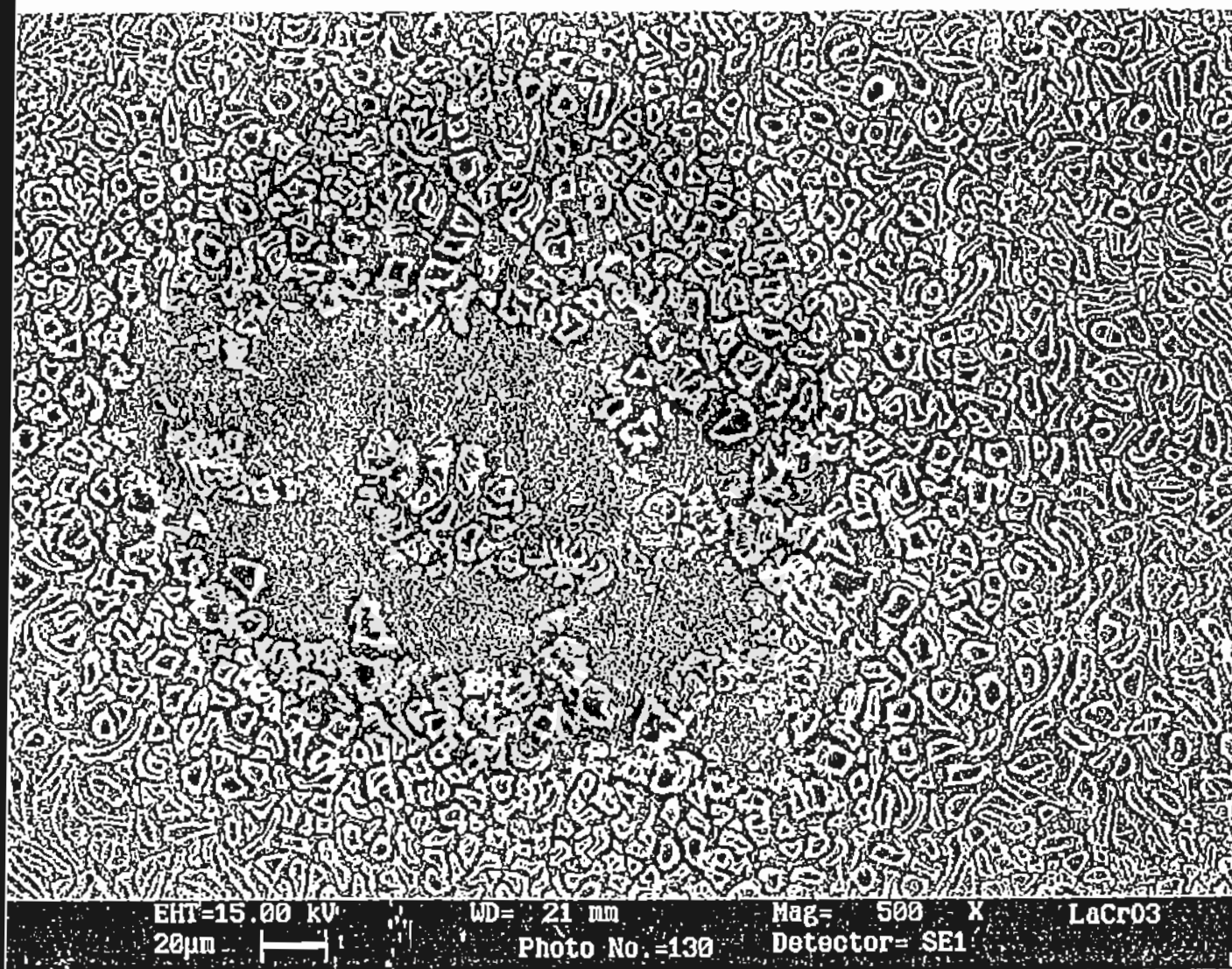
KARAKTERISASI SEM, EDAX, BET

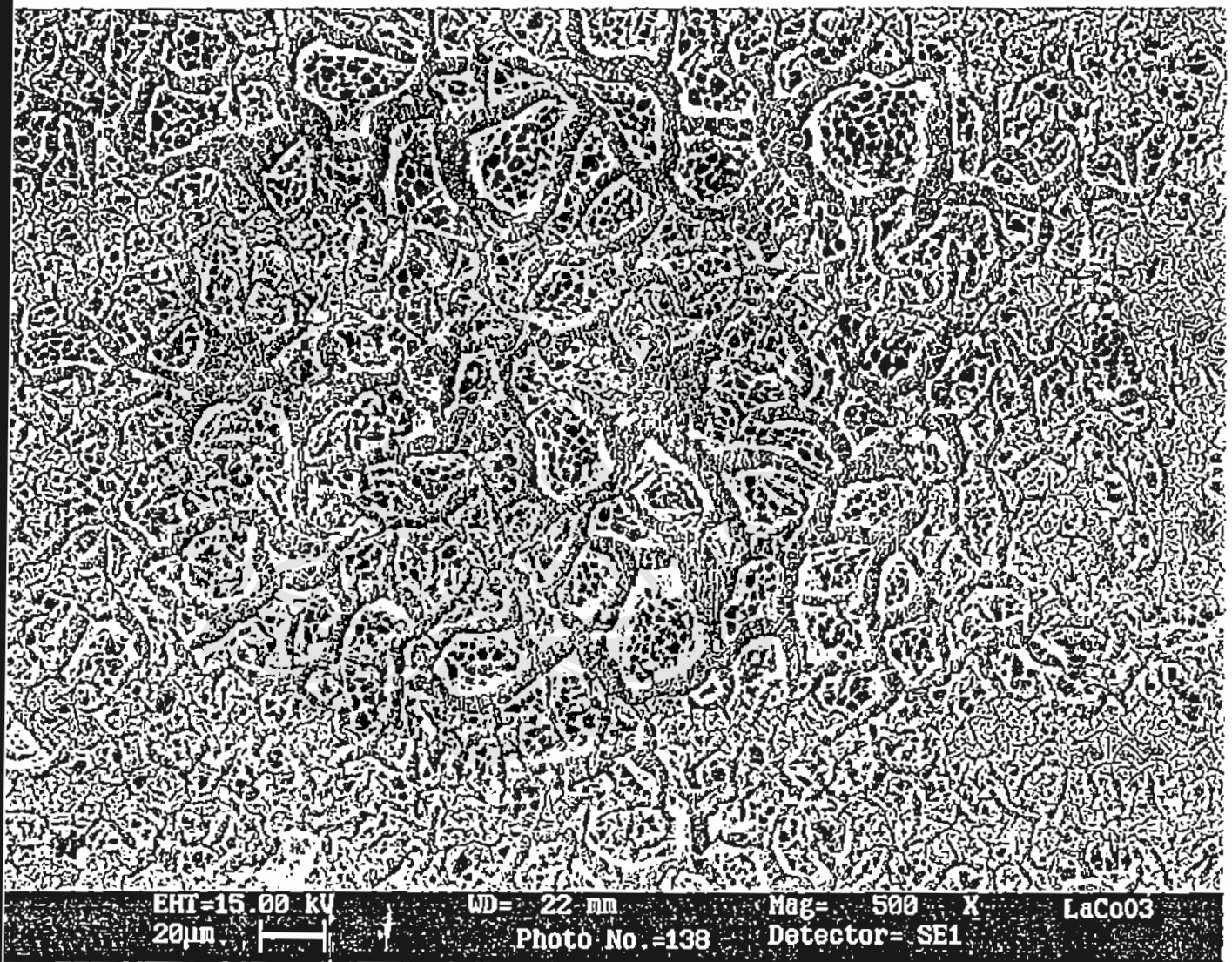


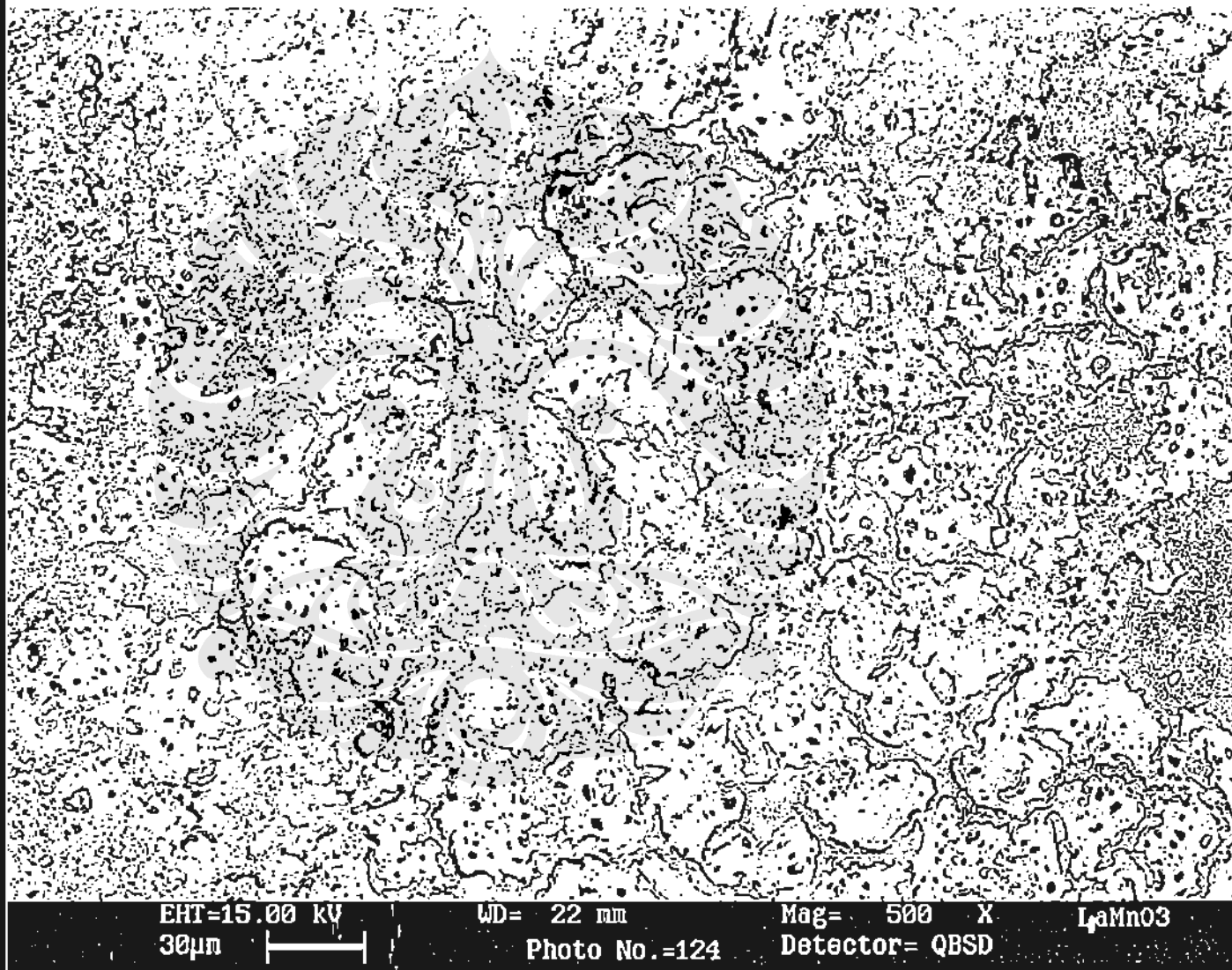


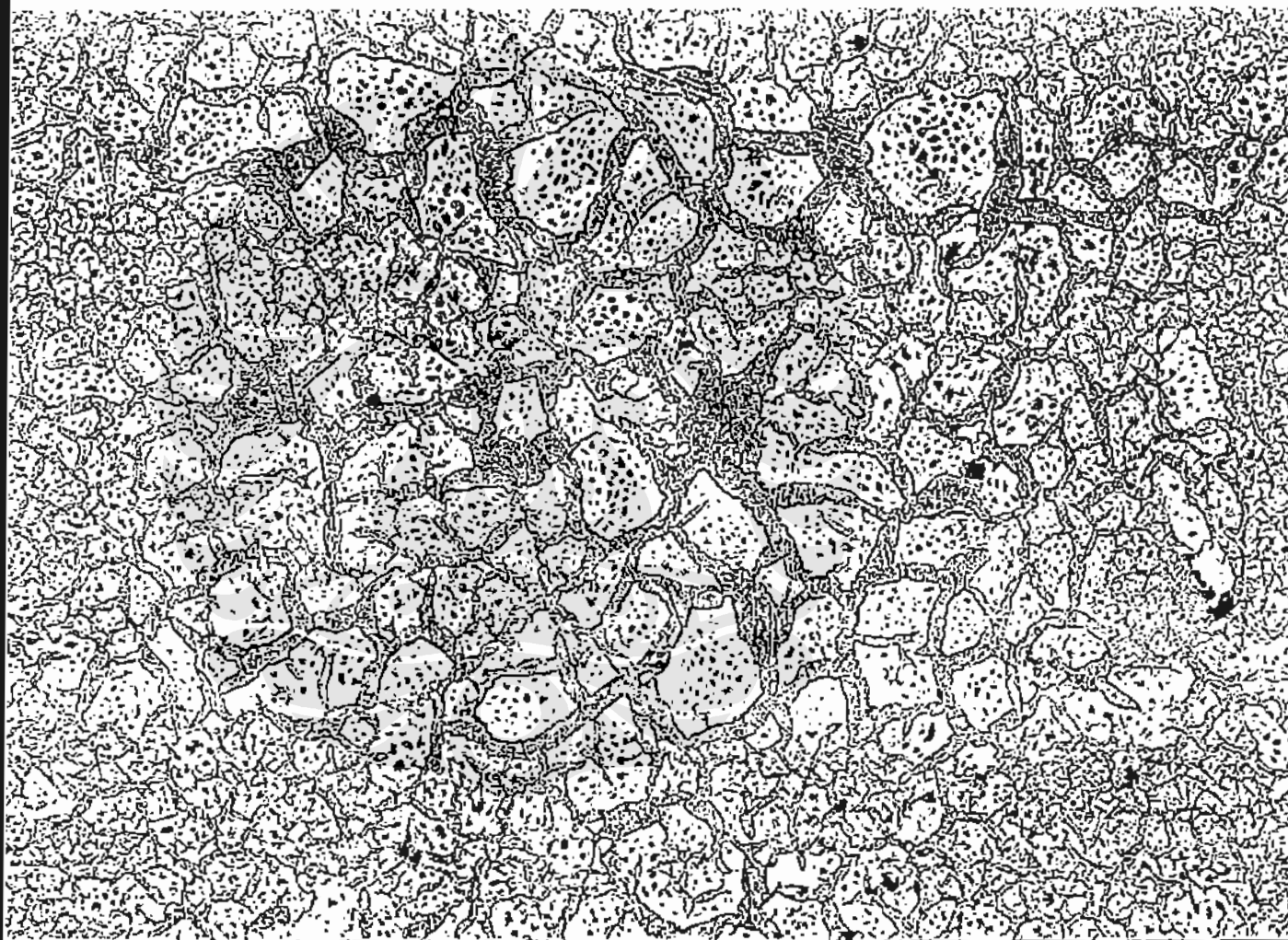












EHT=15.00 kV
30µm

WD= 22 mm

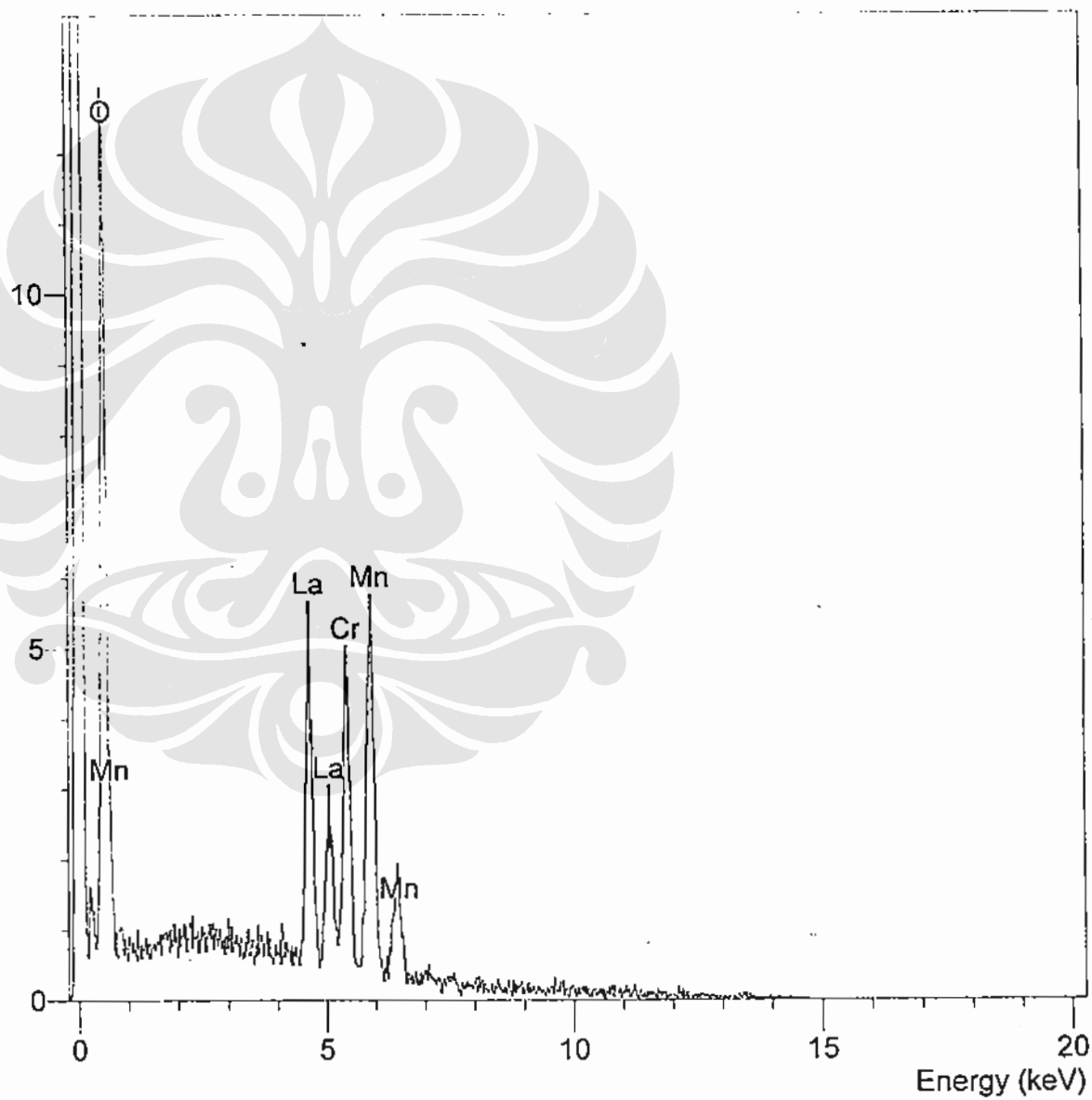
Photo No.=134

Mag= 500 X
Detector= QBSD

LaCoO3

Operator : jaya
Client : Metallurgical UI
Job : X- Ray Analysis with SiLi detector
LaMnO3 (13/08/02 15:04)

cps



SEMQuant results. Listed at 15:08:22 on 13/08/02
 Operator: jaya
 Client: Metallurgical UI
 Job: X- Ray Analysis with SiLi detector
 Spectrum label:

Calibration data: Energy Resn. Area
 Strobe: -7.5 102.67 762505
 Calib. element: 6393.2 167.58 11577
 Gain factor = 50.009
 Livetime = 49.3 seconds

Sample data: Energy Resn. Area
 Strobe: -7.5 102.83 767632
 Total spectrum counts = 25086
 Livetime = 49.5 seconds

System resolution = 107 eV

Geometry (degrees):
 Tilt = 0.00

ED geometry (degrees):
 Elevation = 35.00
 Azimuth = 0.00
 Entry angle = 0.00

Accelerating voltage = 15.00 kV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 18/07/02
 Cr K Chrom 18/07/02
 Mn K Mangan 18/07/02
 La L LaB6 16/01/02

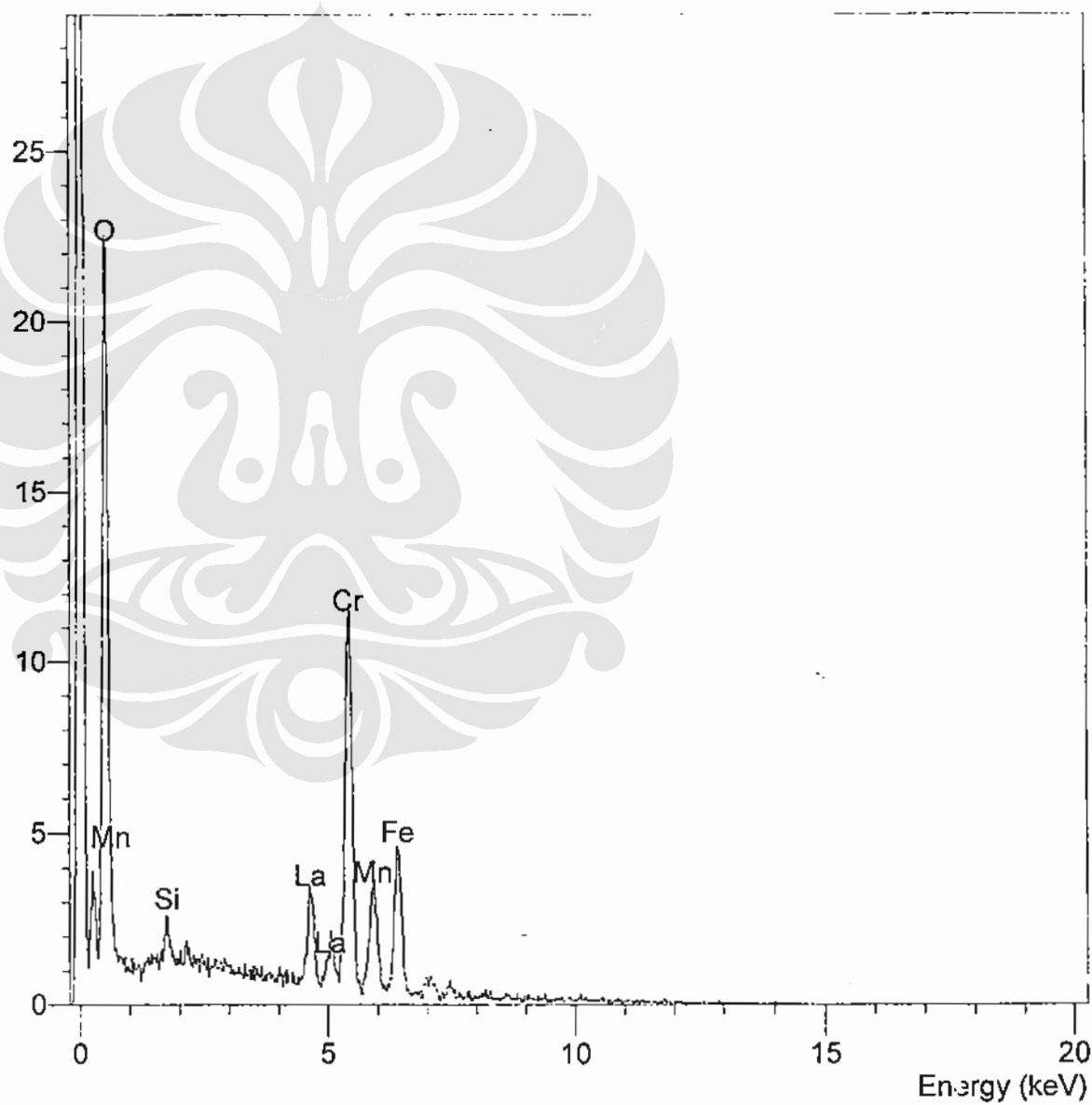
Elmt	Spect.	Apparent	Stat.	k ratio	k Ratio
	Type	Conc.	Sigma		Sigma
O K	ED	8.581	0.236	0.18226	0.00502
Cr K	ED	5.424	0.324	0.05424	0.00324
Mn K	ED	8.300	0.412	0.08301	0.00412
La L	ED	8.861	0.383	0.12922	0.00559

Elmt	Spect.	Inten.	Std	Element	Sigma	Atomic
	Type	Corrn.	Corrn.	%	%	%
O K	ED	1.386	1.00	20.77	0.65	53.92
Cr K	ED	1.010	1.00	18.02	0.96	14.39
Mn K	ED	0.950	1.00	29.31	1.16	22.15
La L	ED	0.932	1.00	31.90	1.12	9.54
Total				100.00		100.00

* = <2 Sigma

Operator : jaya
Client : Metallurgical UI
Job : X- Ray Analysis with SiLi detector
LaCrO3 (13/08/02 15:18)

cps



SEMQuant results. Listed at 15:20:05 on 13/08/02
 Operator: jaya
 Client: Metallurgical UI
 Job: X- Ray Analysis with SiLi detector
 Spectrum label:

Calibration data: Energy Resn. Area
 Strobe: -7.5 102.67 762505
 Calib. element: 6393.2 167.58 11577
 Gain factor = 50.009
 Livetime = 49.3 seconds

Sample data: Energy Resn. Area
 Strobe: -7.5 102.74 764622
 Total spectrum counts = 34871
 Livetime = 49.4 seconds

System resolution = 107 eV

Geometry (degrees):
 Tilt = 0.00

ED geometry (degrees):
 Elevation = 35.00
 Azimuth = 0.00
 Entry angle = 0.00

Accelerating voltage = 15.00 kV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 2.16 keV

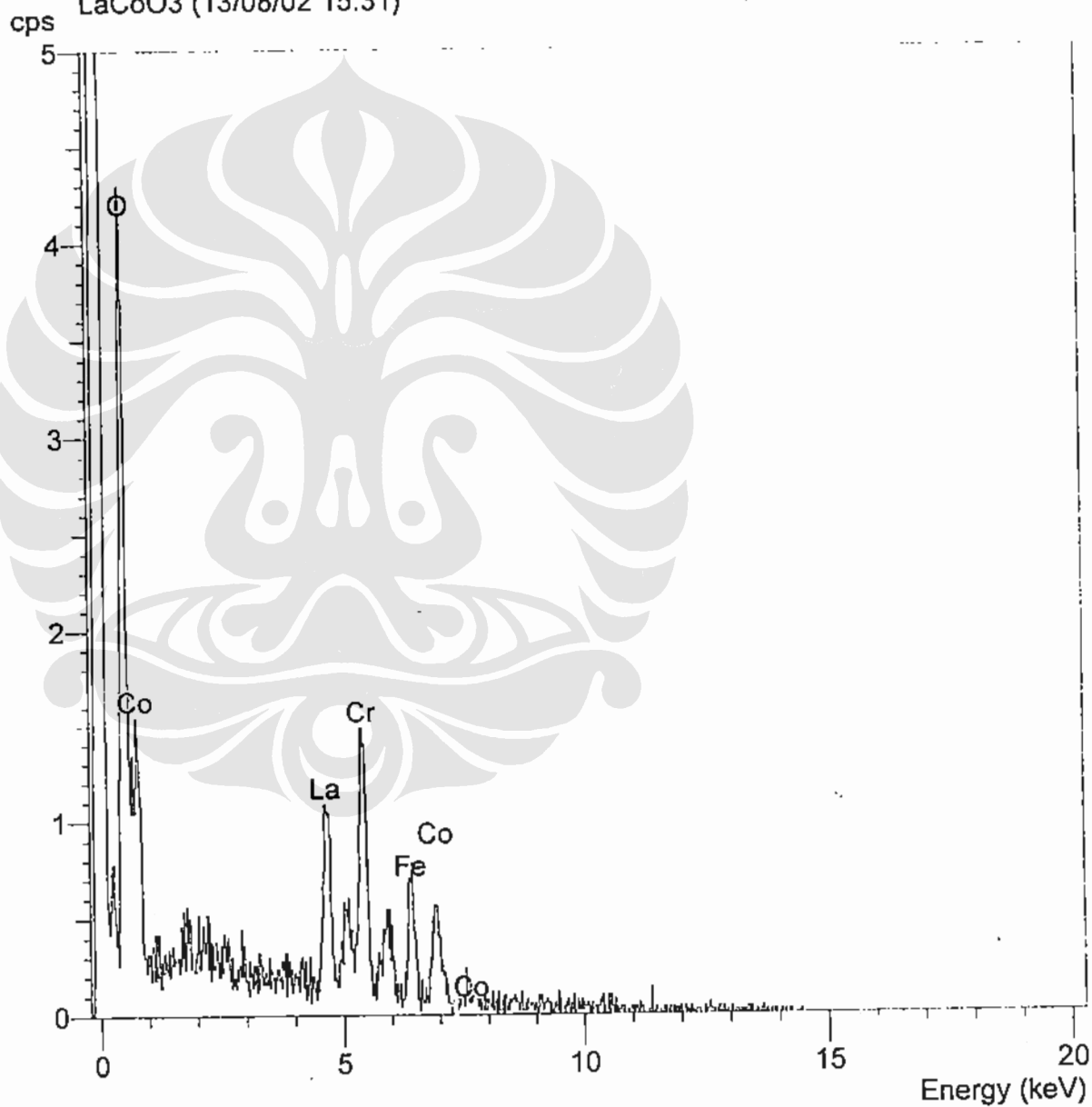
Standards :
 O K AL2O3 18/07/02
 Si K Wollastonite 14/07/02
 Cr K Chrom 18/07/02
 Mn K Mangan 18/07/02
 Fe K Fe 18/07/02
 La L LaB6 16/01/02

Elmt	Spect. Type	Apparent Conc.	Stat. Sigma	k ratio	k Ratio Sigma
O K	ED	16.209	0.352	0.34429	0.00747
Si K	ED	0.439	0.082	0.01843	0.00347
Cr K	ED	15.043	0.453	0.15044	0.00453
Mn K	ED	3.223	0.354	0.03223	0.00354
Fe K	ED	8.016	0.410	0.08017	0.00410
La L	ED	5.432	0.333	0.07922	0.00485

Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
O K	ED	1.387	1.00	25.47	0.62	55.86
Si K	ED	0.859	1.00	1.11	0.21	1.39
Cr K	ED	0.984	1.00	33.32	0.86	22.48
Mn K	ED	0.926	1.00	7.59	0.78	4.85
Fe K	ED	0.910	1.00	19.19	0.85	12.06
La L	ED	0.889	1.00	13.31	0.74	3.36
Total				100.00		100.00

* = <2 Sigma

Operator : jaya
Client : Metallurgical UI
Job : X- Ray Analysis with SiLi detector
LaCoO3 (13/08/02 15:31)



SEMQuant results. Listed at 15:33:38 on 13/08/02
 Operator: jaya
 Client: Metallurgical UI
 Job: X- Ray Analysis with SiLi detector
 Spectrum label:

Calibration data: Energy Resn. Area
 Strobe: -7.5 102.67 762505
 Calib. element: 6393.2 167.58 11577
 Gain factor = 50.009
 Livetime = 49.3 seconds

Sample data: Energy Resn. Area
 Strobe: -7.5 102.68 773229
 Total spectrum counts = 8116
 Livetime = 49.8 seconds

System resolution = 107 eV

Geometry (degrees):
 Tilt = 0.00

ED geometry (degrees):
 Elevation = 35.00
 Azimuth = 0.00
 Entry angle = 0.00

Accelerating voltage = 15.00 kV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 18/07/02
 Cr K Chrom 18/07/02
 Fe K Fe 18/07/02
 Co K Co 18/07/02
 La L LaB6 16/01/02

Elmt	Spect.	Apparent	Stat.	k ratio	k Ratio
	Type	Conc.	Sigma		Sigma
O K	ED	2.912	0.176	0.06184	0.00374
Cr K	ED	1.664	0.177	0.01664	0.00177
Fe K	ED	1.338	0.168	0.01338	0.00168
Co K	ED	1.166	0.216	0.01166	0.00216
La L	ED	1.840	0.186	0.02684	0.00272

Elmt	Spect.	Inten.	Std	Element	Sigma	Atomic
	Type	Corrn.	Corrn.	%	%	%
O K	ED	1.346	1.00	25.33	1.65	59.16
Cr K	ED	1.014	1.00	19.21	1.87	13.81
Fe K	ED	0.934	1.00	16.78	1.90	11.23
Co K	ED	0.923	1.00	14.79	2.41	9.38
La L	ED	0.902	1.00	23.89	2.11	6.43
Total				100.00		100.00

* = <2 Sigma

Laboratorium RRK-KGA Jurusan TGP FTUI
Quantachrome Autosorb 6 Automated Gas Sorption System Report
ANYGAS Version 2.40

Sample ID..... Herliati
Sample Description..... La/CoO₃
Comments.....
Gas Type..... Nitrogen
Cross-Sec Area.. 16.2 Å² Corr Factor..6.580E-05 Molec wgt.. 28.0134
Sample Weight... 0.1235 g P/Po Toler...3 File Name.. Herli.Ra
Analysis Time... 69.8 min Equil Time...2 Operator... Eko
Outgas Time..... 16.0 hrs Outgas Temp..150°C Station #.. 2
End of Run..... Wed Jan 29 11:25:15

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY
SURFACE AREA DATA

Single Point BET.....	2.016E+00	m ² /g
Multi Point BET.....	3.165E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.325E+01	m ² /g
Meso Pore Area.....	3.165E+00	m ² /g
* t-Method Micro Pore Area.....	0.000E+00	m ² /g
DR-Method Micro Pore Area.....	4.023E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Radius less than 8.0 Å at P/Po = 0.10402.....	5.134E-04	cc/g
* t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Radius.....	2.846+00	Å
* Note MP and t-Method values based on data points with t-Tags.		

Laboratorium RRK-KGA Jurusan TGP FTUI
 Quantachrome Autosorb 6 Automated Gas Sorption System Report
 ANYGAS Version 2.40

Sample ID..... Herliati
 Sample Description..... La/MnO₃
 Comments.....
 Gas Type..... Nitrogen
 Cross-Sec Area.. 16.2 Å² Corr Factor..6.580E-05 Molec wgt.. 28.0134
 Sample Weight... 0.1135 g P/Po Toler...3 File Name.. Herli2.Rav
 Analysis Time... 65,8 min Equil Time...2 Operator... Dko
 Outgas Time..... 16.0 hrs Outgas Temp..150°C Station #.. 2
 End of Run..... Thu Jan 30 13:15:35

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY
 SURFACE AREA DATA

Single Point BET.....	2.156E+00	m ² /g
Multi Point BET.....	3.346E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.415E+01	m ² /g
Meso Pore Area.....	3.346E+00	m ² /g
* t-Methode Micro Pore Area.....	0.000E+00	m ² /g
DR-Methode Micro Pore Area.....	4.156E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Radius less than 7.9 Å at P/Po = 0.10402.....	5.324E-04	cc/g
* t-Methode Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Radius.....	2.746+00	Å
* Note MP and t-Methode values based on data points with t-Tags.		

Laboratorium RRK-KGA Jurusan TGP FTUI
Quantachrome Autosorb 6 Automated Gas Sorption System Report
ANYGAS Version 2.40

Sample ID..... Herliati
Sample Description..... La/CrO3
Comments.....
Gas Type..... Nitrogen
Cross-Sec Area.. 16.2 Å² Corr Factor..6.580E-05 Molec wgt.. 28.0134
Sample Weight... 0.3448 g P/Po Toler...3 File Name.. Herlil.R
Analysis Time... 74.0 min Equil Time...2 Operator... Eko
Outgas Time..... 16.0 hrs Outgas Temp..150°C Station #.. 3
End of Run..... Thu Jan 30 11:28:44

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY
SURFACE AREA DATA

Single Point BET.....	2.647E+00	m ² /g
Multi Point BET.....	3.874E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.505E+01	m ² /g
Meso Pore Area.....	3.874E+00	m ² /g
* t-Methode Micro Pore Area.....	0.000E+00	m ² /g
DR-Methode Micro Pore Area.....	4.566E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Radius less than 7.9 Å at P/Po = 0.10402.....	5.512E-04	cc/g
* t-Methode Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Radius.....	2.545+00	Å
--------------------------	----------	---

* Note MP and t-Methode values based on data points with t-Tags.



LAMPIRAN C

TABEL HASIL PERHITUNGAN

HASIL PERHITUNGAN EFISIENSI TERMAL KOMPOR GAS

Nilai kalor fuel (HV fuel) 0,0217 kkal/ml
 Massa air yang dimasak (m) 2 kg
 Panas jenis air (Cp) 1 kkal/kg°C
 Panas penguapan air (L) 542,081 kkal/kg
 Waktu Alir Gas 700ml/min

menit ke-	Konvensional			Bunsen+ TB tp katalis			TB LaMnO ₃			TB LaCrO ₃			TB LaCoO ₃		
	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi
0	28		0	28		0	28		0	32		0	28		0
1	32		52,657	34	554	78,985	34	555	78,985	38	562	78,985	34	577	78,985
2	36	< 550	52,657	40	559	78,985	39	563	72,403	43	575	72,403	39	579	72,403
3	42		61,433	45	558	74,597	43	566	65,821	49	577	74,597	45	572	74,597
4	45		55,948	50	563	72,403	47	569	62,530	53	576	69,112	49	574	69,112
5	48		52,657	54	564	68,453	52	570	63,188	58	579	68,453	54	578	68,453
6	51		50,462	59	570	68,015	57	569	63,627	63	579	68,015	59	579	68,015
7	54		48,895	63	562	65,821	62	572	63,940	68	581	67,701	64	575	67,701
8	57		47,120	67	560	64,175	67	573	64,175	72	582	65,821	69	580	67,466
9	60		46,806	71	567	62,895	72	573	64,358	76	581	64,358	73	576	65,821
10	63		46,074	74	566	60,555	76	574	63,188	80	582	67,508	77	579	64,504
11	66		45,476	77	564	58,640	80	573	62,230	100	583	84,279	80	578	65,506
12	70		46,074	80	565	59,942	100	575	77,079				100	581	82,829
13	73		45,568	100	567	75,290									
14	77		46,074												
15	80		45,636												
22,21	100		53,117												
eff 1	80		45,636	80		59,942	80		62,230	80		67,508	80		65,506
eff 2	100		53,117	100		75,290	100		77,079	100		84,279	100		82,829
t masak	15	menit		11,42				11		9,36				10,45	
t mendidih	22,21	menit		16,38				16		14,22				15,32	
mi-mo	0,065	Kg		0,08				0,08		0,085				0,09	

Ket : eff 1 = efisiensi saat mulai menguap (diasumsikan tidak ada massa yang menguap)
 eff 2 = efisiensi saat mendidih

Laju Alir Gas = 900ml/mln		Konvensional			Bunsen+ TB tp katalis			TB LaMnO ₃			TB LaCrO ₃			TB LaCoO ₃		
menit ke-		T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi
		27		0	26		0	26		0	27		0	26		0
0																
1		31		40,955	34	553	81,910	34	555	81,910	35	560	81,910	34	558	81,910
2		34	< 550	35,836	42	560	81,910	42	560	81,910	42	560	76,791	41	563	76,791
3		39		40,955	49	557	78,497	49	561	78,497	48	563	71,671	47	562	71,671
4		44		43,515	56	558	76,791	56	562	76,791	54	560	69,112	53	566	69,112
5		49		45,051	62	559	73,719	62	562	73,719	60	571	67,576	60	565	69,624
6		54		46,074	68	558	71,671	68	564	71,671	68	575	69,965	67	564	69,965
7		59		46,806	74	555	70,209	74	565	70,209	75	576	70,209	73	562	68,746
8		63		46,074	77	554	65,899	80	571	73,037	80	576	76,216	80	562	74,918
9		68		46,643	80	556	65,899	100	573	82,306	100	580	90,407	100	568	87,908
10		73		47,098	100	559	74,647									
11		77		46,540												
12		80		47,352												
13		100		60,590												
eff 1		80		47,352	80		65,899	80		73,037	80		76,216	80		74,918
eff 2		100		60,590	100		74,647	100		82,306	100		90,407	100		87,908
t masak		11,46	menit			8,39			7,57			7,12			7,38	
t mendidih		16	menit			13,31			12,24			11,03			11,46	
mf-mo (Kg)		0,08	Kg			0,085			0,09			0,09			0,09	

Ket : eff 1 = efisiensi saat mulai menguap (diasumsikan tidak ada massa yang menguap)

eff 2 = efisiensi saat mendidih

Laju Alir Gas = menit ke-		1100ml/min										TB LaMnO3				TB LaCrO3				TB LaCoO3			
		Konvensional		Bunsen+ TB tp katalis		TB LaMnO3		TB LaCrO3		TB LaCoO3		T flame		Efisiensi		T flame		Efisiensi		T flame		Efisiensi	
T air	T flame	Effisiensi	T air	T flame	Effisiensi	T air	T flame	Effisiensi	T air	T flame	Effisiensi	T air	T flame	Effisiensi	T air	T flame	Effisiensi	T air	T flame	Effisiensi	T air	T flame	Effisiensi
0	27	0	28		0	29		0	29		0	29		0	27		0	27		0	27		0
1	32	41,886	36	576	67,017	37	563	67,017	37	564	67,017	37	564	67,017	35	562	67,017	35	562	67,017	35	562	67,017
2	38	< 550	44	583	67,017	46	565	71,206	46	576	67,017	45	576	67,017	43	568	67,017	43	568	67,017	43	568	67,017
3	43	44,678	51	583	64,225	55	571	72,602	55	580	67,017	53	580	67,017	50	570	64,225	50	570	64,225	50	570	64,225
4	47	41,886	58	584	62,829	63	568	71,206	63	581	64,923	60	581	64,923	57	573	62,829	57	573	62,829	57	573	62,829
5	52	41,886	64	587	60,316	69	569	67,017	69	580	63,667	67	580	63,667	65	572	63,667	65	572	63,667	65	572	63,667
6	58	43,282	70	585	58,640	75	567	64,225	75	579	61,433	73	579	61,433	73	569	64,225	73	569	64,225	73	569	64,225
7	64	44,279	76	583	57,443	80	568	68,358	80	578	61,034	80	578	61,034	80	570	67,681	80	570	67,681	80	570	67,681
8	67	41,886	80	581	61,182	100	571	86,691	100	585	87,336	100	585	87,336	100	571	82,376	100	571	82,376	100	571	82,376
9	72	41,886	100	584	79,889																		
10	80	46,491																					
14	100	59,507																					
eff 1	80	46,491	80		61,182	80		68,358	80		69,469	80		67,681	80		67,681	80		67,681	80		67,681
eff 2	100	59,507	100		79,889	100		86,691	100		87,336	100		82,376	100		82,376	100		82,376	100		82,376
t masak	9,55	menit		7,12			6,25			6,15			6,56										
t mendidih	13,52	menit		10,25			9,48			9,41			10,18										
mi-mo (Kg)	0,085	Kg		0,095			0,1			0,1			0,1										

Ket :
 eff 1 = efisiensi saat mulai menguap (diasumsikan tidak ada massa yang menguap)
 eff 2 = efisiensi saat mendidih

Laju Alir Gas menit ke-		1300 ml/min										TB LaCrO ₃				TB LaCoO ₃				
		Konvensional		Bunsen+ TB tp katalis		TB LaMnO ₃		TB LaCrO ₃		TB LaCoO ₃		T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi	T air	T flame	Efisiensi
		T air	T flame	T air	T flame	T air	T flame	T air	T flame	T air	T flame	29	566	0	29	566	0	27	564	0
0		27		28		29		29		29		37	560	56,707	39	566	70,884	36	564	63,795
1		34		37	577	37	577	37	560	37	560	46	565	60,251	48	569	67,340	45	576	63,795
2		40	< 550	45	581	46	581	46	565	46	565	55	569	61,433	56	568	63,795	54	575	63,795
3		46		52	576	55	576	55	569	55	569	63	568	60,251	64	570	62,023	63	573	63,795
4		52		60	578	63	578	63	568	63	568	72	570	60,960	72	575	60,960	70	574	60,960
5		58		67	580	72	580	72	570	72	570	80	572	60,251	80	573	59,458	76	572	57,888
6		65		74	581	80	581	80	572	80	572	100	572	84,457	100	575	84,043	80	573	60,109
7		70		80	576	100	576	100	572	100	572							100		84,191
8		75		100	582															
9		80																		
10		100																		
eff 1		80		80		80		80		80		80		60,251	80		59,458	80		60,109
eff 2		100		100		100		100		100		100		84,457	100		84,043	100		84,191
t masak			8,43		6,49		6		6		6					6,08			6,25	
t mendidih			11,46		9		8,12		8,12		8,12					8,16			8,2	
mi-mo (Kg)			0,09		0,1		0,095		0,095		0,095					0,095			0,09	

Ket :
 eff 1 = efisiensi saat mulai menguap (diasumsikan tidak ada massa yang menguap)
 eff 2 = efisiensi saat mendidih

PERHITUNGAN GAS HASIL PEMBAKARAN NON-KATALITIK DAN KATALITIK

EMISI GAS C₃

Top Burner	Menit	Laju Alir Bahan Bakar (ml/menit)											
		700			900			1100			1300		
		peak	ppmv	peak	ppmv	peak	ppmv	peak	ppmv	peak	ppmv	peak	ppmv
Konvensional	2	13043	25,3852061	17361	33,789202	21269	41,395227	22993	44,7505976				
	10	10635	20,6985867	16136	31,405021	14768	28,742523	20663	40,2157872				
	20	9880	19,2291525	14555	28,327967	12208	23,76007	17863	34,7662299				
Bunsen+ TB tanpa katalis	2	9327	18,1528649	10610	20,64993	12132	23,612154	13740	26,7417566				
	10	8214	15,9866659	9311	18,121725	11229	21,854671	12869	25,046555				
	20	6978	13,5810755	8130	15,823179	10229	19,908401	10029	19,5191468				
Bunsen+ TB LaMnO ₃	2	8133	15,8290179	9082	17,676029	10033	19,526932	11772	22,9114963				
	10	7283	14,174688	7808	15,19648	9283	18,067229	10520	20,4747656				
	20	6165	11,9987576	7608	14,807226	8565	16,669807	9397	18,2891038				
Bunsen+ TP LaCrO ₃	2	7696	14,9784977	8984	17,485294	9886	19,24083	10596	20,6226822				
	10	6132	11,9345307	7422	14,44522	8883	17,288721	10076	19,6106215				
	20	5224	10,1673171	6642	12,927129	7385	14,373208	9683	18,8457372				
Bunsen+ TB LaCoO ₃	2	8532	16,6055799	9356	18,209307	10246	19,941487	11656	22,6857289				
	10	7592	14,7760856	8016	15,601304	10972	21,35448	10172	19,7974635				
	20	6846	13,3241678	7256	14,122139	9812	19,096806	9150	17,808375				

EMISI GAS C₄

Top Burner	Menit	Laju Alir Bahan Bakar (ml/menit)											
		700			900			1100			1300		
		peak	ppmv	peak	peak	ppmv	peak	ppmv	peak	ppmv	peak	ppmv	ppmv
Konvensional	2	19238	33,452007	20064	34,898727	21907	38,104387	27885	48,50234258				
	10	10467	18,20599	17386	30,240693	17657	30,712063	24283	42,23713053				
	20	6566	11,420706	14806	25,753118	15620	27,168965	20343	35,3840113				
Bunsen + TB tanpa katalis	2	15660	27,23854	18976	33,006292	19829	34,489975	24066	41,85968717				
	10	20110	34,978738	16164	28,115183	15932	27,711649	24403	42,44585498				
	20	18874	32,828876	14300	24,872996	14814	25,767033	21100	36,70071467				
Bunsen + TB LaMnO ₃	2	14959	26,019241	15753	27,400301	15859	27,584675	15982	27,79861715				
	10	13362	23,241467	14687	25,546133	12362	21,502096	14342	24,94604975				
	20	11861	20,630672	11949	20,783736	11931	20,752428	14161	24,63122372				
Bunsen + TB LaCrO ₃	2	14211	24,718192	14764	25,980064	14807	25,754857	16211	28,19693296				
	10	13436	23,37018	13672	23,780672	12188	21,199446	13736	23,89199131				
	20	12065	20,985503	10983	19,103505	11565	20,115818	13365	23,24668491				
Bunsen + TB LaCoO ₃	2	14362	24,980837	14960	26,020981	15523	27,000246	17073	29,69627021				
	10	13877	24,137243	13975	24,307701	12026	20,917668	15544	27,03677293				
	20	12346	21,474267	12214	21,24467	11906	20,708944	13926	24,22247168				

EMISI GAS CO

Top Burner	Menit	Laju Alir Bahan Bakar (ml/menit)											
		700			900			1100			1300		
		peak	ppmv	ppmv	peak	ppmv	ppmv	peak	ppmv	ppmv	peak	ppmv	ppmv
Konvensional	2	102216	26		158890	40		264941	67		183104	46	
	10	307159	78		311467	79		297032	75		311434	79	
	20	239004	61		287036	73		290617	74		302069	77	
Bunsen+ TB tanpa katalis	2	299746	76		259506	66		422998	107		210393	53	
	10	383915	97		395242	100		436126	111		321282	82	
	20	399648	101		416005	106		403334	102		323158	82	
Bunsen+ TB LaMnO3	2	187654	48		259874	66		301259	76		198658	50	
	10	354871	90		389546	99		395324	100		281245	71	
	20	384975	98		416854	106		408578	104		201865	51	
Bunsen+ TB LaCrO3	2	183783	47		243784	62		295355	75		192479	49	
	10	342441	87		378648	96		389230	99		275019	70	
	20	363757	92		402748	102		402992	102		198136	50	
Bunsen+ TB LaCoO3	2	191523	49		259965	66		309625	79		201568	51	
	10	362541	92		389687	99		401235	102		285876	73	
	20	374563	95		419865	107		412356	105		206879	53	

EMSI GAS NO, CO2

BURNER	men.	700 ml/menit			900 ml/menit			1100 ml/menit			1300 ml/menit		
		NO/NOx		CO2	NO/NOx		CO2	NO/NOx		CO2	NO/NOx		CO2
		ppm	T flame	%	ppm	T flame	%	ppm	T flame	%	ppm	T flame	%
Konvensional	5	4		5,8	58000	3		5,6	55000	4		5,5	55000
	10	4		5,8	58000	5		5,7	57000	5		5,8	58000
	15	5		5,9	59000	8		5,8	58000	9		5,9	59000
Bunsen+TB tnp kat.	5	9	573	4,4	44000	8		4,2	42000	8	572	4	40000
	10	4	565	4,5	45000	10	582	4,3	43000	10	575	4,1	41000
	15	5	570	4,6	46000	12	591	4,3	43000	13	579	4,2	42000
Bunsen+TB LaMnO3	5	7	574	5,5	55000	4	565	4,7	47000	5	569	4,6	46000
	10	4	565	5,6	56000	6	560	5	50000	7	575	4,9	49000
	15	4	566	5,7	57000	9	565	5,2	52000	10	574	5,1	51000
Bunsen+TB LaCrO3	5	6	562	5,5	55000	5	560	5,7	57000	7	570	5,5	55000
	10	3	562	5,7	57000	8	565	5,1	51000	8	565	5,8	58000
	15	4	569	5,8	58000	12	569	5,2	52000	10	576	5,9	59000
Bunsen+TB LaCoO3	5	5	570	5,8	58000	6	568	4,7	47000	7	569	4,5	45000
	10	3	560	5,1	51000	6	570	5	50000	6	575	4,8	48000
	15	5	566	5,2	52000	12	579	5	50000	11	576	5	50000

Emisi CO rata-rata

Top Burner	Laju Alir Gas (ml/menit)			
	700	900	1100	1300
Konvensional	55	64	72	67
Bunsen+TB tnp katalis	92	91	107	72
Bunsen+TB LaMnO3	78	90	94	58
Bunsen+TB LaCrO3	75	87	92	56
Bunsen+TB LaCoO3	75	87	107	56

Emisi CO2 rata-rata (ppmv)

Burner	Laju alir bahan bakar (ml/menit)			
	700	900	1100	1300
Konvensional	58333	56667	57333	58667
Bunsen+TB tnp kat.	45000	42667	41000	58500
Bunsen+TB LaMnO3	56000	49667	48667	61667
Bunsen+TB LaCrO3	56667	53333	57333	64333
Bunsen+TB LaCoO3	53667	49000	47667	61333

Emisi C4 rata-rata tiap Top Burner (ppmv)

Top Burner	Laju Alir Gas (ml/menit)			
	700	900	1100	1300
Konvensional	21	30	32	42
Bunsen+TB tnp katalis	32	29	29	40
Bunsen+TB LaMnO3	23	25	23	26
Bunsen+TB LaCrO3	23	23	22	25
Bunsen+TB LaCoO3	24	24	23	27

Emisi NO rata-rata (ppmv)

Burner	Laju alir bahan bakar (ml/menit)			
	700	900	1100	1300
Konvensional	4	5	6	7
Bunsen+TB tnp kat.	6	10	10	14
Bunsen+TB LaMnO3	5	6	7	11
Bunsen+TB LaCrO3	4	8	8	15
Bunsen+TB LaCoO3	4	8	8	14

Emisi C3 rata-rata

Top Burner	Laju Alir Gas (ml/menit)			
	700	900	1100	1300
Konvensional	22	31	31	40
Bunsen+TB tnp katalis	16	18	22	24
Bunsen+TB LaMnO3	14	16	18	21
Bunsen+TB LaCrO3	12	15	17	20
Bunsen+TB LaCoO3	12	15	22	20

PERHITUNGAN FAKTO-FAKTOR EMISI CO, CO2 dan UHC

BURNER	700 ml/menit						Faktor Emisi, E/fbc				Faktor Emisi, E/fm				900 ml/menit						Faktor Emisi, E/fbc				Faktor Emisi, E/fm					
	UHC		CO		CO2		K		UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	g/burned cycle	g/kg fuel consumed	g/kg fuel consumed	g/burned cycle	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	g/burned cycle	g/kg fuel consumed	g/kg fuel consumed	g/burned cycle	ppm	ppm	ppm	g/burned cycle	g/kg fuel consumed	g/kg fuel consumed
Konvensional	43	55	53333		0,00168	0,63	0,81	858,56	11,9	15,3	16199,2	61	64	56667	0,0022	0,92	0,97	858,1												
TB tanpa kat.	48	92	45000		0,003111	0,91	1,75	857,33	17,3	33,1	16176,1	47	91	42667	0,0032	0,94	1,83	857,2												
LaMnO3	37	78	56000		0,002054	0,57	1,20	858,24	10,7	22,6	16193,2	41	90	49667	0,0026	0,71	1,55	857,7												
LaCrO3	35	75	56667		0,001941	0,53	1,14	858,33	10,0	21,4	16195	38	87	53333	0,0023	0,61	1,40	858												
LaCoO3	36	75	53667		0,002068	0,58	1,20	858,22	10,9	22,6	16192,9	39	87	49000	0,0026	0,68	1,52	857,8												

BURNER	1100 ml/menit						Faktor Emisi, E/fbc				Faktor Emisi, E/fm				1300 ml/menit						Faktor Emisi, E/fbc				Faktor Emisi, E/fm					
	UHC		CO		CO2		K		UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	UHC	CO	CO2	
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		g/burned cycle	g/kg fuel consumed	g/burned cycle	g/kg fuel consumed	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
Konvensional	63	72	57333	0,002355	0,94	1,08	857,98	11,3	12,9	10299,9	82	67	58667	0,0025	1,2	1,0	857,8	12,2	10,0	8726,6										
TB tanpa kat.	51	107	41000	0,003854	1,07	2,24	856,70	12,8	26,8	10284,5	64	72	58500	0,0023	0,9	1,1	858,0	9,5	10,7	8728,4										
LaMnO3	41	94	48667	0,002774	0,72	1,66	857,62	8,7	19,9	10295,6	47	58	61667	0,0017	0,7	0,8	858,5	6,7	8,2	8733,9										
LaCrO3	39	92	57333	0,002285	0,58	1,38	858,04	7,0	16,5	10300,6	45	56	64333	0,0016	0,6	0,7	858,7	6,1	7,6	8735,0										
LaCoO3	45	107	47667	0,003189	0,81	1,92	857,27	9,7	23,1	10291,3	47	56	61333	0,0017	0,7	0,8	858,6	6,7	8,0	8734,1										



LAMPIRAN D

CONTOH PERHITUNGAN

CONTOH PERHITUNGAN KONSENTRASI GAS BUANG (ppmv)

- Diketahui nilai respon/slope tiap komponen murni dari grafik hasil kalibrasi, yaitu :

Komponen	Nilai Respon
C ₃	1e6
C ₄	3e8

- Contoh perhitungan untuk data hasil analisis GC pada kondisi operasi :

Temperatur kolom/injector = GC FID : 100/130°C

Laju alir bahan bakar = 900 ml/menit

Laju alir sample (gas buang) = 1 ml/detik

Waktu sampling = menit ke-5

Waktu charge (*by pass*) = 5 menit

Waktu discharge (*inject*) = 5 detik

Dari hasil eksperimen dengan menggunakan GC FID diperoleh peak tiap-tiap komponen gas buang, yaitu :

Komponen	Waktu Retensi	Area Peak
C ₃	2.3	75821
C ₄ (gabungan n-butana, iso-butana dan butilen)	6-8	54490

Komponen C₃ :

$$\begin{aligned} \text{Slope} &= \text{area/volume} \\ \text{Volume} &= 75821/1e6 \\ \text{Volume} &= 0.07378 \mu\text{l} \\ \text{Konsentrasi} &= \frac{0.07378 \mu\text{l}}{1 \text{ ml/det} * 5 \text{ det.} * 10^{-3} \text{ l/ml}} \\ \text{Konsentrasi} &= 14.76 \text{ ppmv} \end{aligned}$$

Komponen C₄ :

$$\begin{aligned} \text{Slope} &= \text{area/volume} \end{aligned}$$

$$\text{Volume} = 54490/3e8$$

$$\text{Volume} = 0.0001816$$

$$\text{Konsentrasi} = \frac{0.0001816 \text{ ml} * 10^3 \mu\text{l/ml}}{1 \text{ ml/det.} * 5 \text{ det.} * 10^{-3} \text{ l/ml}}$$

$$\text{Konsentrasi} = 36.32 \text{ ppmv}$$



CONTOH Perhitungan Efisiensi hasil pembakaran

$$W_i \text{ (initial water)} = 2 \text{ Kg}$$

$$W_f - W_o = 0.08 \text{ Kg}$$

$$F \text{ (Flow rate of fuel)} = 900 \text{ ml/menit}$$

$$= 54 \text{ liter/jam}$$

$$= 15 \text{ ml/detik}$$

$$T_f = 100^\circ\text{C} \quad T_o = 26^\circ\text{C}$$

$$L \text{ (laten heat vaporization of water)} = 40,656 \text{ Kj/mol}$$

$$= 2258,67 \text{ Kj/Kg}$$

$$t \text{ masak} = 16 \text{ men.}$$

$$H_w \text{ (net caloric value of main fuel (Btu/ft}^3\text{))} =$$

HV pada kondisi standar untuk

$$\text{Propana} = 2322,01 \text{ Btu/ft}^3$$

$$\text{Butana} = 3018,48 \text{ Btu/ft}^3$$

Spesifikasi LPG cair (Pertamina) yang dipakai :

Propana = 11 kg ; Butana 13 kg

Tekanan outlet regulator selama eksperimen sebesar 2 bar,

Fraksi mol masing-masing komponen dalam fasa uap

Dengan hukum Raoult's

$$x_1 = (11/44) / ((11/44) + (13/58)) = 0.52727$$

$$x_2 = (1 - x_1) = 0.47273$$

$$P_{\text{sat}} = \exp(A - (B/T + C)) \text{ kpa}$$

Untuk Propana =>

$$A = 13,7097$$

$$B = 1872,82$$

$$C = -25,1011$$

$$\text{Maka } P_{1\text{sat}} = 941,06482$$

Untuk Butana =>

$$A = 13,9836$$

$$B = 2292,44$$

$$C = -27,8623$$

$$\text{Maka } P_{2\text{sat}} = 244,05886$$

$$P = P2 \text{ sat} + (P1 \text{ sat} - P2 \text{ sat}) * x1 = 611,5711$$

$$y1 \text{ (fraksi uap propana) } = (x1 * P1 \text{ sat}) / P$$

$$y2 \text{ (fraksi uap Butana) } = 1 - y1$$

$$y_{\text{Propana}} = 0.8113$$

$$y_{\text{Butana}} = 0.1887$$

Maka HV fuel aliran masuk kompor sebesar :

$$= 2453,40 \text{ Btu/ft}^3$$

$$\text{eff. (\%)} = (Q_{\text{air}} / Q_{\text{fuel}}) * 100$$

$$Q_{\text{air}} = W_i * c_p * (T_f - T_o) + (W_f - W_i) * L$$

$$= 797,36000 \text{ Kj}$$

$$Q_{\text{fuel}} = F * t * H_w$$

$$= 314,60 \text{ kkal}$$

$$= 1310,84 \text{ kJ}$$

$$\text{Maka Efisiensi (\%)} = \underline{60,828011}$$

Contoh Perhitungan Faktor Emisi :

Berdasarkan pada basis karbon, dalam 1000 gram bahan bakar LPG terdapat 860 gr Carbon (EPA, 2000).

Dengan menggunakan persamaan 2.18 sampai 2.26

Faktor Emisi per cycle percobaan = EF_{bc} (g/burncycle)

CO_2 as g carbon = $FC/(1+K)$

$$K = (CO + UHC)/CO_2$$

Untuk UHC, CO dan CO_2 masing-masing 43, 55 dan 58333 ppm, maka

$$K = 0,00168, FC = 860, \text{ maka}$$

$$CO_2 \text{ as g carbon} = 858,56$$

$$\begin{aligned} CO \text{ as g carbon} &= \text{emisi rasio untuk CO} \times CO_2 \text{ as g carbon} \\ &= (55/58333) \times 858,56 \\ &= 0,81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} UHC \text{ as g carbon} &= \text{emisi rasio untuk UHC} \times CO_2 \text{ as g carbon} \\ &= (43/58333) \times 858,56 \\ &= 0,63 \end{aligned}$$

Faktor Emisi per unit fuel = EF_m (g/kg konsumsi fuel)

Untuk konsumsi bahan bakar 53 gr (laju 700 ml/menit), maka

$$EF_m CO_2 = 858,56 \times 1000/53 = 16199 \text{ g/kg}$$

$$EF_m CO = 0,81 \times 1000/53 = 15,3$$

$$EF_m UHC = 0,63 \times 1000/53 = 11,9$$