

Pemodelan dan Analisis Berdasarkan Studi Eksperimental Pengaruh Modifikasi Profil Gigi Terhadap Karakteristik Dinamis pada *Involute Spur Gear*

Prasetyo Putra Wibowo dan Agus Sigit Pramono

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: pramono@me.its.ac.id

Abstrak—Roda gigi atau *gear* merupakan salah satu elemen mesin yang berfungsi untuk mentransmisikan daya. Sumber transmisi sebuah gear berasal dari kontak dan gesekan yang terjadi pada pasangan gear yang diteruskan oleh porosnya. Kontak dan gesekan yang terjadi merupakan sumber utama kegagalan pada roda gigi apabila dipadukan dengan kesalahan-kesalahan (*error*) dalam perancangan, assembly, dan machining roda gigi. Usaha yang dapat dilakukan untuk mengurangi masalah tersebut adalah dengan memodifikasi profil gigi dengan bentuk *tip relief* pada involute spur gear. *Tip relief* adalah pemotongan bagian *flank* pada roda gigi dengan bentuk parabolik dan linier. Material yang digunakan untuk penelitian ini adalah S45C. Simulasi regangan dinamis dilakukan dengan analisa *Transient Structure*, sedangkan analisa getaran dilakukan dengan analisa *Harmonic Response* pada software FEA. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah terjadi reduksi nilai regangan dan getaran pada profil modifikasi parabolik dan linier. Nilai reduksi yang terjadinya selanjutnya dibandingkan dengan hasil eksperimen dan didapatkan *error* dari simulasi yang dilakukan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi pada perindustrian terhadap kesalahan proses *assembly* dan *machining* yang terjadi pada pasangan roda gigi.

Kata Kunci—*Involute spur gear*, *tip relief*, regangan dinamis, getaran, *finite element method*.

I. PENDAHULUAN

AKTIVIS perindustrian umumnya menggunakan mesin-mesin berkapasitas besar dan memiliki umur yang panjang. Kinerja mesin tersebut sangat dipengaruhi dari kondisi komponennya, khususnya pada *gearbox*-nya. *Gearbox* sendiri terdiri dari susunan roda gigi yang disusun sedemikian rupa agar dapat mentransmisikan daya secara optimum. Roda gigi atau *gear* adalah elemen mesin yang berfungsi untuk mentransmisikan daya. Daya yang ditransmisikan berasal dari kontak dan gesekan yang terjadi antar *gear*, kemudian diteruskan oleh porosnya. Selain roda gigi, terdapat pula rantai dan *belt* yang memiliki fungsi mentransmisikan daya. Namun, dibandingkan dua pilihan tersebut, roda gigi memiliki keuntungan [1], yaitu :

- a) *Reliability* yang lebih tinggi
- b) Kemampuan menerima beban yang lebih tinggi
- c) Efisiensi lebih baik, karena kemungkinan slip kecil
- d) Sistem transmisi ringkas dengan putaran dan daya lebih besar

Secara umum kegagalan yang terjadi pada roda gigi adalah *wear*, *surface fatigue*, dan *plastic wear*, yang disebabkan tegangan kontak dan *beakage* yang dihasilkan tegangan *bending*, apalagi jika dipadukan dengan kesalahan-kesalahan (*error*) dalam perancangan, pemasangan, dan manufaktur roda gigi. Jika roda gigi pada ini mengalami kerusakan, maka akan terjadi kerusakan yang lebih buruk pada komponen lain dari mesin tersebut. Kondisi ini dapat menyebabkan proses produksi terhenti dan menyebabkan kerugian biaya yang sangat besar. Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi masalah-masalah tersebut adalah dengan memodifikasi profil gigi pada gear.

Penelitian ini menggunakan bentuk modifikasi *tip relief* dengan bentuk profil parabolik dan linier. Material yang digunakan untuk penelitian ini adalah S45C. Pasangan gear ini selanjutnya dimodelkan secara 3D dengan software *Computer Aided Design* (CAD), lalu dianalisa dengan software *Finite Element Analysis* (FEA). Analisa regangan dinamis dilakukan dengan menggunakan analisa *Transient Structure*, sedangkan analisa getaran dilakukan dengan menggunakan analisa *Harmonic Response*. Analisa regangan dinamis dilakukan dengan variasi 100, 200, dan 300 rpm, sedangkan analisa getaran dilakukan dengan variasi 200, 300, 400, 500, dan 600 rpm.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Aditya, Novreza [2] memodelkan serta menganalisis perubahan distribusi tegangan pada *spur gear* dengan bentuk profil *involute* dan *cycloid*, hasilnya didapatkan bahwa tegangan pada profil gigi *involute* 1,23 kali lebih besar dari *cycloid*. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Pramono, Agus Sigit [3] melakukan pembuatan, modifikasi, serta pengujian pada *involute spur gear* dengan jenis profil seperti profil standard, modifikasi parabolik sedang, modifikasi parabolik panjang, dan modifikasi linier. Bentuk modifikasi yang dilakukan menghasilkan regangan dinamis serta getaran yang lebih rendah bila dibandingkan dengan profil standard dari *involute spur gear*. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Temis, Y., Kozharinov E., dan Kalinin D [4] melakukan analisa tegangan dan getaran dengan bantuan software FEA, hasil yang didapatkan pada penelitian ini menunjukkan terjadinya diskontinuitas getaran akibat hilangnya kontak pada gigi pada critical range melalui frequency response, sedangkan pada metode finite element didapatkan distribusi beban pada fase *teeth meshing* (kondisi pada saat roda gigi saling bertautan).

II. URAIAN PENELITIAN

A. Pemodelan

Tabel 1.

Data Geometri <i>Involute Spur Gear</i>		
PARAMETER	SIMBOL	NILAI
<i>Pitch Circle Diameter</i>	dp	72 mm
<i>Number of Teeth</i>	Nt	18
<i>Pressure Angle</i>	θ	20 ⁰
<i>Module</i>	m	4 mm
<i>Addendum</i>	a	4 mm
<i>Dedendum</i>	b	5 mm
<i>Clearance</i>	c	1 mm
Lebar Gigi	w	6 mm
Material	-	S45C
Rasio Reduksi Putaran	-	2

Tabel 2.

Data Material S45C		
ISTILAH	SATUAN	NILAI
Massa Jenis	kg/m ³	7700 – 8030
<i>Young Modulus</i>	GPa	190 – 210
<i>Tensile Strength</i>	MPa	569
<i>Yield Strength</i>	MPa	343
<i>Poisson Ratio</i>	-	0.27 – 0.30
<i>Elongation</i>	-	> 20%
<i>Hardness</i>	HB	167 – 229
<i>Strength Exponent</i>	-	- 0.106
<i>Ductility Coefficient</i>	-	- 0.47
<i>Thermal Conductivity</i>	W/mK	49.8
<i>Specific Heat</i>	J/ kgK	486

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan data geometri dan material yang tertera pada referensi [3]. Data geometri ditunjukkan oleh tabel 1, sementara data material ditunjukkan dengan tabel 2.

Bentuk Modifikasi Parabolik memiliki persamaan sebagai berikut :

$$L = -0,0005x^2 + 0,6173x - 0,3382 \text{ untuk pinion,}$$

$$L = -0,0013x^2 + 1,2369x - 0,5667 \text{ untuk gear}$$

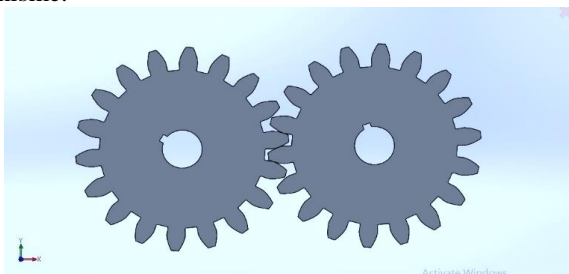
Bentuk Modifikasi Linier memiliki persamaan sebagai berikut :

$$L = 0,5747x + 0,4697 \text{ untuk pinion}$$

$$L = 1,1603x + 0,5382 \text{ untuk gear}$$

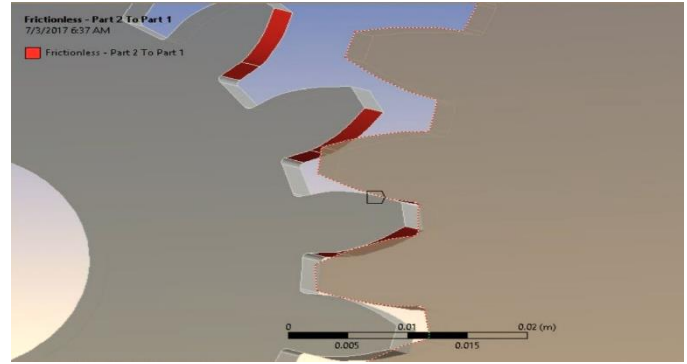
Proses design sendiri diawali dengan membuat *sketch* lingkaran terluar dari gear, kemudian menggunakan fitur *extrude*, lalu membuat *sketch* kurva *involute*, kemudian melakukan *trimming* dan *mirroring* profil kurva, selanjutnya menggunakan fitur *circular pattern*, dan terakhir membuat lubang untuk poros pada kedua *gear*.

Proses *assembly* sendiri terdiri dari pembuatan *sketch base* sebagai peletakan pasangan *gear*, *insert* komponen, *float* pada salah satu komponen *gear*, *front plane* pada *gear* dengan *front plane* pada *sketch base* dengan fitur *concident mate*, dan terakhir menggunakan *gear mate* sebagai penghubung mekanisme.



Gambar 1. Hasil Proses Design dan Assembly pada software CAD

B. Simulasi



Gambar 2. Pendefinisian Contact



Gambar 3. Hasil Meshing Involute Spur Gear

Pendefinisian kondisi batas pada simulasi regangan dinamis terdiri dari penentuan *contact*, *joint*, *meshing* dan *time setting*. Tipe *contact* yang ditunjukkan pada gambar 6 adalah tipe *frictionless* dengan peletakan pada bagian pertautan kontak antar gigi, lalu tipe *joint* yang digunakan adalah tipe *joint revolute body to ground* dengan pusat *joint* diletakkan pada lubang poros pasangan *gear*. Pengaturan *meshing* seperti pada gambar 7 terdiri dari *edge sizing* pada kurva dan tebal gear, lalu *face sizing* pada bagian *clearance* dari kaki gigi.

Pengaturan *time setting* seperti pada tabel 3 dilakukan pada simulasi *Transient Structure* untuk mengetahui perubahan regangan yang terjadi tiap waktunya. *Initial Time Step* ditentukan berdasarkan frekuensi natural dari pasangan *gear* dengan menggunakan persamaan $1/(20.f)$, penentuan *Minimum Time Step* dilakukan berdasarkan ketelitian yang diinginkan dari perubahan regangan tiap waktunya, dan *Step End Time* ditentukan untuk menentukan jumlah *step* yang diinginkan pada simulasi.

Pada simulasi *Harmonic Response* pengaturan dilakukan pada *Analysis Setting* untuk mendapatkan spektrum getaran terhadap perubahan frekuensi, seperti yang terlihat pada tabel 4. Data spektrum yang diambil dilakukan pada range 0-300 Hz, seperti pada referensi [3] dengan interval 60 titik pengambilan data.

Tabel 3.

Time Setting pada Transient Structure	
STEP CONTROLS	ANALYSIS SETTINGS
<i>Number of Steps</i>	1
<i>Current Step Number</i>	1
<i>Step End Time</i>	9.13e-003 s
<i>Auto Time Setting</i>	On
<i>Define By</i>	Time
<i>Initial Time Step</i>	8.3e-004 s
<i>Minimum Time Step</i>	8.3e-006 s

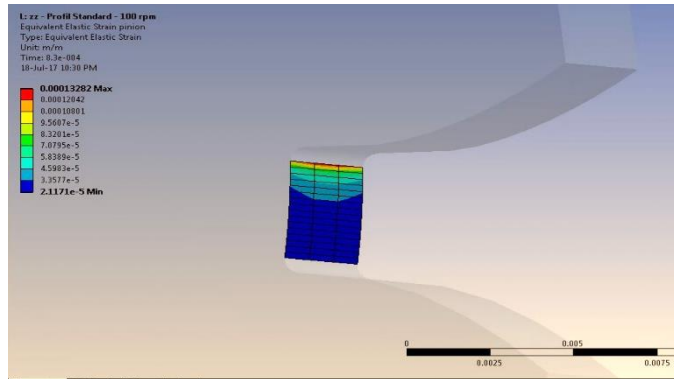
Maximum Time Step	8.3e-004 s
Time Integration	On

Tabel 4.
Analysis Setting pada Harmonic Response

ANALYSIS SETTING	VALUE
Frequency Spacing	Linier
Range Minimum	0 Hz
Range Maximum	300 Hz
Solution Interval	60
Solution Method	Mode Superposition

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

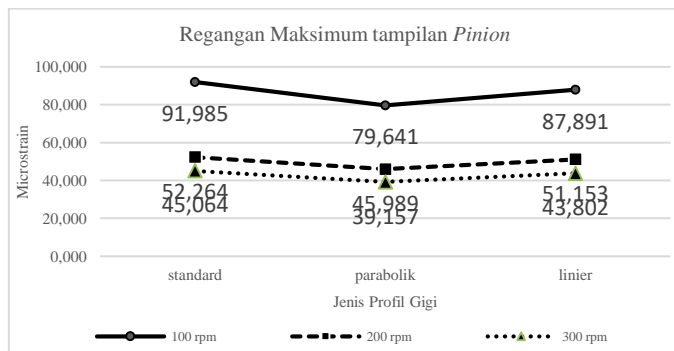
A. Analisis Regangan Dinamis



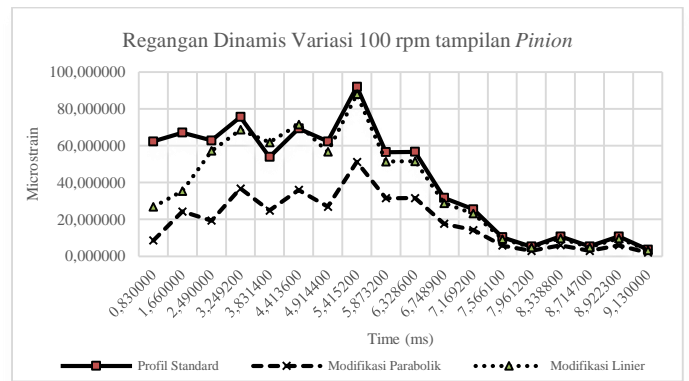
Gambar 4. Contoh Hasil Simulasi Regangan tampilan Pinion

Nilai yang diperoleh melalui hasil simulasi ditunjukkan dengan warna-warna tertentu seperti pada gambar 5 yang menunjukkan rentang nilai minimum sampai dengan nilai maksimum yang terjadi pada model 3D roda gigi

Pengambilan data simulasi diletakkan pada bagian kaki gigi, menyesuaikan dengan letak pengambilan data yang dilakukan pada referensi [3]. Gambar 11 merupakan salah satu olahan data hasil simulasi untuk melihat *trendline* yang terjadi pada hasil simulasi. Pengolahan data ini dilakukan pada kedua pasangan gigi dengan variasi 100, 200, dan 300 rpm. *Trendline* yang terjadi pada hasil simulasi memiliki kesamaan bentuk dan profil bila dibandingkan dengan hasil eksperimen. Setelah melihat bentuk *trendline* pada hasil simulasi, nilai regangan dinamis maksimal pada tiap roda gigi dan variasi diolah kembali untuk mengetahui pengaruh dari modifikasi profil gigi yang telah dilakukan. Hasil olahan data tersebut ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 11. Contoh Grafik Hasil Olahan Data Simulasi



Gambar 12. Contoh Nilai Regangan Maksimum tampilan Pinion

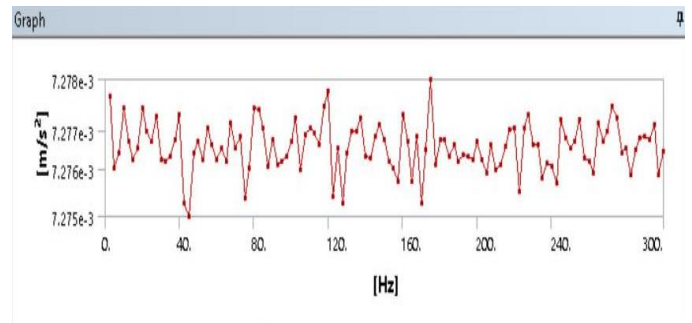
Data regangan dinamis maksimal selanjutnya diolah dan dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk mengetahui besar *error* yang terjadi pada penelitian ini. Perbandingan dan *error* hasil simulasi dan eksperimen ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5.
Perbandingan Regangan Maksimum dan *error*

	simulasi (microstrain)		eksperimen		error (%)		
	pinion	gear	pinion	gear	pinion	gear	
100 rpm	standard	91.99	59.88	69.57	38.33	9.75	14.39
	parabolik	79.64	36.69	44.51	21.76	17.64	16.28
	linier	87.89	28.85	54.24	17.31	15.31	16.00
200 rpm	standard	52.26	27.38	39.40	14.48	9.85	18.84
	parabolik	45.99	25.27	21.93	11.70	20.93	21.48
	linier	51.15	23.03	31.32	9.89	15.51	22.82
300 rpm	standard	45.06	14.69	24.73	9.89	18.05	13.06
	parabolik	39.16	30.64	24.73	13.68	14.74	22.14
	linier	43.80	12.91	20.61	8.24	21.18	14.48
rata-rata error					15.88	17.72	

A. Analisis Getaran

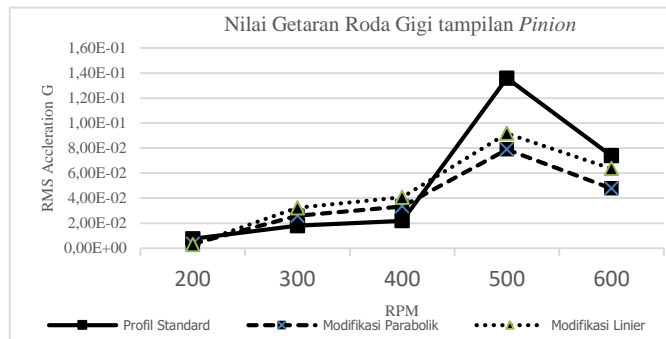
Nilai yang diperoleh melalui hasil simulasi ditunjukkan dengan grafik amplitudo-frekuensi yang menunjukkan rentang nilai minimum sampai dengan nilai maksimum yang terjadi pada model 3D roda gigi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 13.



Gambar 13. Contoh Nilai Getaran Hasil Simulasi tampilan Pinion

Pengambilan nilai simulasi dilakukan pada bagian terluar lubang poros, untuk mendapatkan hasil yang cukup sesuai dengan yang dilakukan pada penelitian [3]. Nilai getaran yang didapatkan pada hasil simulasi kemudian diolah dalam bentuk

grafik untuk mengetahui perubahan getaran yang terjadi pada tiap variasi, ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Contoh Nilai Getaran Profil Standard dan Modifikasi tampilan Pinion

Nilai getaran hasil simulasi selanjutnya diolah dalam bentuk tabel untuk memudahkan komparasi hasil simulasi dan eksperimen. Komparasi ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan dan *error* yang dihasilkan pada hasil simulasi, tabel komparasi tersebut ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 6.

Tabel Getaran dan *error* Hasil Simulasi dan Eksperimen

parameter	simulasi (G)		eksperimen (G)		error (%)		
	pinion	gear	pinion	gear	pinion	gear	
200 rpm	standard	0.007	0.010	0.004	0.006	16.12	15.46
	parabolik	0.003	0.014	0.003	0.009	4.93	14.42
	linier	0.003	0.008	0.002	0.005	17.70	12.50
300 rpm	standard	0.018	0.014	0.014	0.011	9.11	8.05
	parabolik	0.026	0.016	0.018	0.009	12.41	17.21
	linier	0.032	0.024	0.022	0.018	13.09	9.53
400 rpm	standard	0.022	0.020	0.015	0.011	12.61	18.29
	parabolik	0.033	0.014	0.022	0.006	13.24	22.07
	linier	0.041	0.019	0.025	0.010	15.00	18.89
500 rpm	standard	0.136	0.080	0.075	0.038	18.01	20.84
	parabolik	0.079	0.043	0.052	0.026	13.51	15.48
	linier	0.092	0.062	0.058	0.038	14.77	15.45
600 rpm	standard	0.074	0.045	0.053	0.029	11.01	14.74
	parabolik	0.048	0.027	0.022	0.008	21.39	28.64
	linier	0.064	0.051	0.042	0.044	13.71	5.56
rata-rata error						13.77	15.81

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian tentang komparasi modifikasi profil gigi ini, yaitu:

1. *Trendline* pada hasil simulasi memiliki bentuk pola kenaikan, penurunan, dan fluktuasi yang cenderung sama pada tiap hasil simulasi jika dibandingkan dengan hasil eksperimen yang diketahui. yang mirip dengan hasil eksperimen, walaupun memiliki nilai yang berbeda

2. Modifikasi profil gigi mengurangi regangan dinamis yang terjadi dengan rincian sebagai berikut :

- a) Modifikasi Parabolik mengurangi regangan yang terjadi sebesar 13,42 % pada *pinion*, dan sebesar 38,726 % pada *gear* untuk variasi 100 rpm. Pada variasi 200 rpm reduksi regangan terjadi sebesar 12,006 % pada *pinion* dan 7,682 % pada *gear*. Selanjutnya, pada variasi 300 rpm reduksi regangan juga terjadi sebesar 13,108 % pada *pinion*, namun mengalami kenaikan regangan sebesar 108,586 % pada *gear*,
 - b) Modifikasi Parabolik mengurangi regangan yang terjadi dengan rata-rata sebesar 12,95% pada *pinion* dan 9,16% pada *gear*,
 - c) Modifikasi Linier mengurangi regangan yang terjadi sebesar 4,451% % pada *pinion*, dan sebesar 51,818% pada *gear* untuk variasi 100 rpm. Pada variasi 200 rpm reduksi regangan terjadi sebesar 2,126% pada *pinion* dan 15,879% pada *gear*. Selanjutnya, pada variasi 300 rpm reduksi regangan juga terjadi sebesar 2,8% pada *pinion*, dan sebesar 12,072 % pada *gear*,
 - d) Rata-rata reduksi nilai regangan yang terjadi pada modifikasi linier adalah sebesar 3,41% pada *pinion* dan 36,44% pada *gear*
 - e) Modifikasi Parabolik mengurangi getaran yang terjadi dengan rata-rata reduksi sebesar 26,34 % pada *pinion* dan 32,78 % pada *gear*
 - f) Modifikasi Linier mengurangi getaran yang terjadi dengan rata-rata reduksi sebesar 10,09 % pada *pinion* dan 2,63 % pada *gear*
3. Perbedaan antara hasil simulasi dan eksperimen pada tiap variasi dinyatakan dalam bentuk *error*. Total *error* yang terjadi pada keseluruhan simulasi adalah :
 - a) Hasil simulasi regangan dinamis memiliki rata-rata *error* sebesar 15,884 % pada *pinion*, dan sebesar 17,722 % pada *gear*
 - b) Perbandingan hasil yang diperoleh pada hasil simulasi getaran memiliki rata-rata *error* sebesar 13,773 % pada *pinion*, dan sebesar 15,807 % pada *gear*

DAFTAR PUSTAKA

[1] D. W. Dudley, *Gear Tooth Design*. United State of America: McGraw-Hill Inc, 1992.

[2] A. N. Taufan, "Studi Kekuatan Spur Gear Dengan Profil Gigi Cycloid dan Involut," *J. Tek. POMITS*, vol. 1, no. 1, 2012.

[3] A. S. Pramono, *Experimental Study of The Influence of Tooth Vibration*. Swiszerland: Trans Tech Publication Inc, 2006.

[4] S. . Al, Hamrock B.J. et, Jacobson, B., Schmid, *Fundamentals of Machine Elements*. United State of America: McGraw-Hill, 1999.