



UNIVERSITAS INDONESIA

**EFEK FAKTOR BENTUK HADRONIK
DALAM FOTOPRODUKSI KAON PADA NUKLEON**

SKRIPSI

**ANGGUN KOMALA SARI
0806325913**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**Efek Faktor Bentuk Hadronik
dalam Fotoproduksi Kaon pada Nukleon**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

ANGGUN KOMALA SARI

0806325913

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Anggun Komala Sari
NPM : 0806325913
Tanda tangan : 
Tanggal : 7 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Anggun Komala Sari
NPM : 0806325913
Program Studi : S1 Fisika
Judul Skripsi : Efek Faktor Bentuk Hadronik dalam Fotoproduksi
Kaon pada Nukleon

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar sarjana Sains pada Program Studi S1 Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof.Dr. Terry Mart ()

Penguji I : Dr. Agus Salam ()

Penguji II : Dr. Anto Sulaksono ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juni 2012

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama : Anggun Komala Sari
NPM : 0806325913
Program Studi : S1 Reguler
Departemen : Fisika
Peminatan : Fisika Nuklir dan Partikel
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Efek Faktor Bentuk Hadronik dalam Fotoproduksi Kaon pada Nukelon

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan).

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, Juni 2012



Anggun Komala Sari

ABSTRAK

Nama : Anggun Komala Sari
Program Studi : S1 Fisika
Judul Skripsi : Efek Faktor Bentuk Hadronik dalam Fotoproduksi
Kaon pada Nukleon

Penelitian ini menginvestigasi efek dari faktor bentuk hadronik dalam fotoproduksi kaon pada nukleon, $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda$. Telah ditemukan bahwa bentuk faktor bentuk hadronik tertentu dapat memperbaiki kecocokan antara perhitungan model dan data eksperimen, khususnya pada energi tinggi. Namun pengikutsertaan faktor bentuk hadronik dalam perhitungan menjadi sumber terlalu teredamnya cross section pada sudut depan kaon. Penelitian ini bertujuan untuk mencari penyebab hal tersebut sekaligus mencari bentuk faktor bentuk seperti apa yang dapat meredam divergensi pada amplitudo hamburan dan cocok dengan data eksperimen. Data eksperimen untuk differensial cross section, polarisasi tunggal, dan polarisasi ganda pada investigasi ini didapat dari kolaborasi CLAS, GRAAL, dan LEPS. suku Born dan suku resonan pada model dikonstruksi secara kovarian, yaitu dengan menggunakan teknik Feynman. Teori pseudoskalar digunakan untuk menghitung verteks hadronik dalam amplitudo. Beberapa bentuk faktor bentuk hadronik telah dianalisis dan hasil numeriknya dibandingkan dengan data dalam rangka untuk mengetahui faktor bentuk yang cocok untuk fotoproduksi kaon.

Kata kunci:

Faktor bentuk hadronik, fotoproduksi kaon, suku Born, diagram Feynman *tree-level*, model isobarik

ABSTRACT

Name : Anggun Komala Sari
Program : Undergraduate Physics
Title : Effects of Hadronic Form Factor in Kaon
Photoproduction off Nucleon

We have investigated the effect of hadronic form factors in kaon photoproduction off the nucleon, $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda$. It is found that certain forms of hadronic form factors can significantly improve the agreement between model calculation and experimental data, especially at higher energies. However, the inclusion of hadronic form factors might also become the source of oversuppression of the cross section at forward kaon angles. In this research we are interested in locating the origin of this problem as well as the types of form factor which can suppress the divergence of scattering amplitudes and simultaneously yield the best agreement with experimental data. Experimental data on differential cross section, single and double polarization from CLAS, GRAAL, and LEPS collaborations have been used in this investigation. The born and resonance terms of the model are constructed in covariant way, i.e. by using Feynman technique. We used the pseudoscalar theory to calculate the hadronic vertices in the amplitude. Several forms of hadronic form factor have been analyzed and the corresponding numerical results are compared to data in order to determine the appropriate form factor in kaon photoproduction.

Keywords:

Hadronic form factor, kaon photoproduction, Born terms, Feynman tree-level diagram, isobaric model.

KATA PENGANTAR

Penelitian yang ditulis dalam skripsi ini berawal sejak setahun yang lalu, dimana saat itu saya meminta saran kepada Prof. Dr. Terry Mart tentang topik skripsi apa yang sebaiknya diambil dan kemudian beliau menawarkan topik tentang faktor bentuk hadronik pada fotoproduksi kaon. Terimakasih banyak kepada beliau karena selalu meluangkan waktunya untuk mengajari murid-murid bimbingannya dalam penelitian ini.

Selain itu saya juga ingin berterimakasih kepada seluruh dosen-dosen Fisika UI, khususnya dosen-dosen peminatan Nuklir dan Partikel: Dr. L.T Handoko, Dr. Anto Sulaksono, Dr. Imam Fachruddin, dan Dr. Agus Salam atas ilmu-ilmu yang telah diajarkan selama ini. Tidak lupa terimakasih kepada Drs. Djoenaedi Saleh yang telah menjadi pembimbing akademik saya dan selalu mempunyai kata-kata bijak untuk menyemangati saya. Selain kepada dosen-dosen di Fisika UI, saya juga berterimakasih kepada guru-guru yang telah mengajarkan saya di SDN Pesanggrahan 10, SMPN 177 Jakarta, dan SMAN 70 Bulungan. Berkat didikan beliau-beliau semua saya bisa berada di Fisika UI ini.

Tak lengkap jika belum mengucapkan terimakasih kepada teman-teman Fisika UI, khususnya angkatan 2008 yang selalu membuat hari-hari perkuliahan menjadi ceria. Juga kepada teman-teman saya sejak SMA, terimakasih telah menjadi teman baik saya hingga saat ini. Secara tidak langsung mereka semua berjasa dalam pengerjaan skripsi ini karena selalu dapat mengurangi kepenatan saya saat berinteraksi dengan mereka.

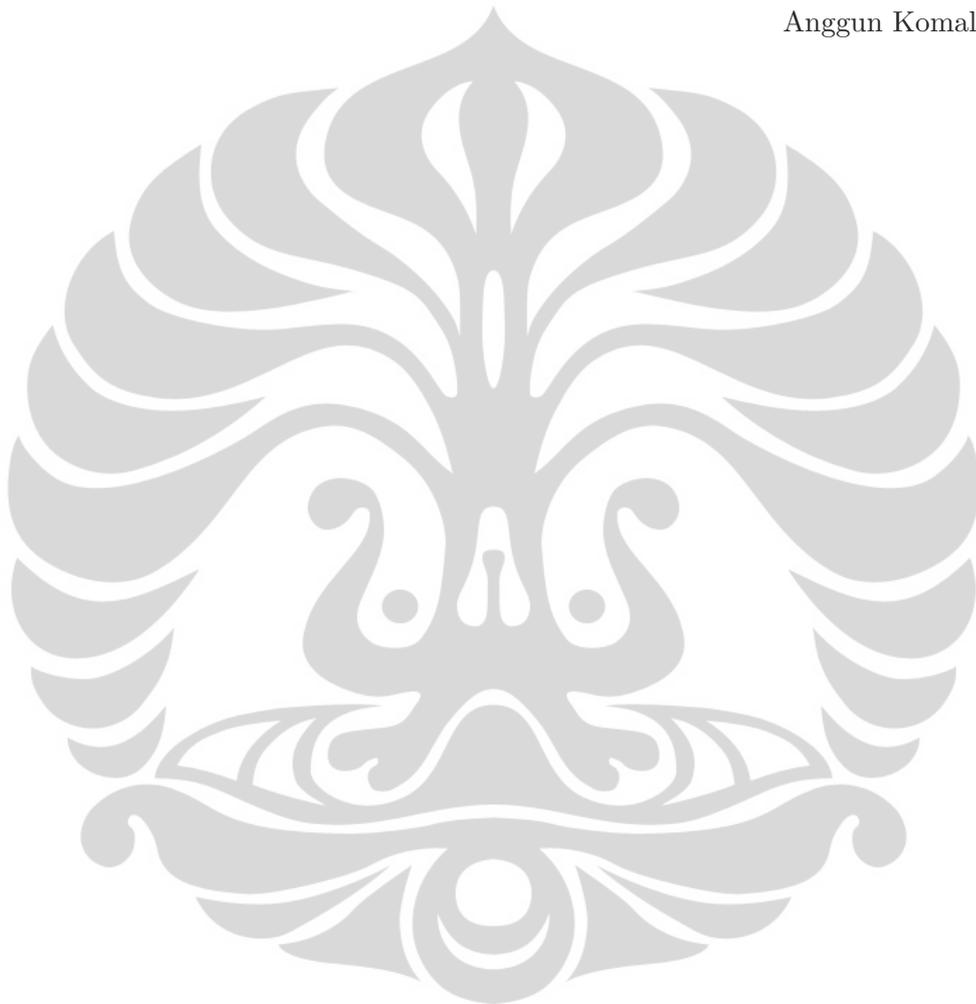
Untuk Andy Octavian Latief yang selalu menanyakan perkembangan skripsi ini, terimakasih untuk tidak pernah bosan memberikan semangat. Semoga Allah juga selalu memudahkan jalanmu dalam menggapai cita-cita.

Teruntuk kakak-kakakku, mas Bondan Eka Buana dan mbak Dewi Puspita Sari, terimakasih selalu memberi support kepada adiknya ini. Ucapan terimakasih paling istimewa ditujukan untuk orangtuaku tercinta, bapak Sugeng Widodo dan ibu Nur'aini. Semoga Bapak dan Ibu sehat selalu dan semoga Allah memberikan balasan yang jauh lebih baik atas perjuangan kalian dalam merawat dan mendidik anak-anaknya ini. Skripsi ini saya persembahkan untuk kalian.

Rasa terimakasih terbesar dipersembahkan kepada Allah Subhana wa ta'ala karena hanya dengan kehendakNya saya dapat berada di sini dan menyelesaikan skripsi berjudul "Efek Faktor Bentuk Hadronik dalam Fotoproduksi Kaon pada Nukleon" ini.

Depok, Juni 2012

Anggun Komala Sari



DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | iii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI | v |
| ABSTRAK | vi |
| KATA PENGANTAR | viii |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR | xiv |
| DAFTAR TABEL | xv |
| 1 Pendahuluan | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Metode Penelitian | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 4 |
| 2 Formalisme Fotoproduksi Kaon pada Nukleon | 5 |
| 2.1 Model Isobarik | 6 |
| 2.2 Formulasi Perhitungan Amplitudo | 8 |
| 2.3 Formulasi Perhitungan Observabel | 10 |
| 3 Faktor Bentuk Hadronik | 12 |
| 3.1 Pengertian Faktor Bentuk Hadronik | 12 |
| 3.2 Macam-macam Bentuk Faktor Bentuk Hadronik | 13 |
| 3.3 Pemasukkan Faktor Bentuk Hadronik ke dalam Perhitungan | 14 |
| 4 Pengolahan dan Analisis Teori | 16 |
| 4.1 <i>Fitting</i> Program | 16 |
| 4.2 Hasil dan Analisis | 17 |
| 5 Kesimpulan | 32 |

| | |
|---|-----------|
| A Invarian Tera | 33 |
| A.1 Syarat Invarian Tera | 33 |
| A.2 Matriks Invarian Tera dan Lorentz | 33 |
| B Amplitudo | 34 |
| DAFTAR ACUAN | 35 |



DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Partikel kaon pertama kali diobservasi. Kaon meluruh menjadi partikel pion dan membentuk seperti huruf V terbalik pada pojok kanan bawah gambar [1]. | 2 |
| 1.2 | Elektron yang terhambur pada elektroproduksi dapat dianggap sebagai foton virtual. | 2 |
| 2.1 | Multiplet dari meson (kiri) dan baryon (kanan) berdasarkan isospin dan <i>strangeness</i> -nya. | 5 |
| 2.2 | Diagram Feynman suku Born. Dari kiri ke kanan adalah kanal s, u, dan t. | 7 |
| 2.3 | Diagram Feynman untuk kontribusi partikel-partikel resonan. Dari kiri ke kanan adalah kanal s, u, dan t. | 7 |
| 3.1 | Kiri: hamburan elektron-elektron tidak mempunyai faktor bentuk. Kanan: letak faktor bentuk elektromagnetik pada hamburan elektron-proton. | 12 |
| 3.2 | Letak faktor bentuk hadronik pada reaksi $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda$ berada pada verteks yang menghubungkan proton, kaon, dan hiperon. . . . | 13 |
| 4.1 | Grafik penampang lintang total dari reaksi $\gamma + p \leftrightarrow K^+ + \Lambda$ dengan memasukkan berbagai macam bentuk faktor bentuk hadronik. Penampang lintang total teori dibandingkan dengan data eksperimen dari CLAS 2006. Terlihat bahwa faktor bentuk dipol serta faktor bentuk general orde 2 dan 3 cocok dengan data eksperimen di energi lebih besar dari 1.8 GeV. | 20 |
| 4.2 | Penampang lintang pada sudut belakang kaon. Data point biru dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 21 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.3 | Penampang lintang pada $\cos \theta = -70^{\circ}$. Masih di sekitar sudut belakang kaon. Data point biru dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 22 |
| 4.4 | Penampang lintang sudut tengah. Data point biru dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 23 |
| 4.5 | Penampang lintang mulai tidak teratur saat mulai memasuki sudut depan kaon. Data point biru, merah, dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 24 |
| 4.6 | Penampang lintang di dekat sudut depan kaon. Berbeda dengan penelitian sebelumnya seperti yang disebutkan di Bab 1.2, penampang lintang dengan faktor bentuk tidak mengalami peredaman yang ekstrim di daerah ini. Penampang lintang dengan faktor bentuk justru menunjukkan peredaman yang besar. Data point biru, merah, dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 25 |
| 4.7 | Polarisasi foton terhadap sudut. Data point biru berasal dari Spring 8. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 26 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.8 | Polarisasi Λ terhadap energi pada sudut yang berbeda-beda. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 27 |
| 4.9 | Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 1.674 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 28 |
| 4.10 | Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 1.860 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 29 |
| 4.11 | Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 1.982 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 30 |
| 4.12 | Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 2.185 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu. | 31 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Faktor bentuk yang digunakan dalam penelitian. Digunakan penamaan yang lebih singkat untuk macam-macam faktor bentuk yang digunakan di dalam penelitian ini. | 15 |
| 4.1 | Nilai chi kuadrat dari tiap bentuk faktor bentuk hadronik diurutkan sesuai tabel 3.1. Dapat dilihat bahwa nilai chi kuadrat jika diurutkan dari yang terkecil hingga yang terbesar adalah bentuk general orde 4, bentuk general orde 3, bentuk dipol, bentuk general orde 2, bentuk Gaussian, bentuk general orde 1, bentuk monopol, dan tanpa faktor bentuk. | 17 |
| 4.2 | Nilai konstanta kopling (CC) dalam setiap faktor bentuk hadronik. HFF 1 tidak memakai faktor bentuk hadronik, HFF 2 memakai faktor bentuk monopol, HFF 3 memakai faktor bentuk dipol, dan HFF 4 memakai faktor bentuk Gaussian. Nilai-nilai konstanta kopling Kaon-Lambda-Nukleon ($g_{K\Lambda N}/\sqrt{4\pi}$) dan konstanta kopling Kaon-Sigma-Nukleon $g_{K\Sigma N}/\sqrt{4\pi}$ di semua HFF cocok dengan prediksi SU(3). | 18 |
| 4.3 | Nilai konstanta kopling (CC) dalam setiap faktor bentuk hadronik general. Dengan HFF 5 merupakan orde 1, HFF 6 adalah orde 2, HFF 7 adalah orde 3, dan HFF 8 adalah orde 4. Nilai-nilai konstanta kopling Kaon-Lambda-Nukleon ($g_{K\Lambda N}/\sqrt{4\pi}$) dan konstanta kopling Kaon-Sigma-Nukleon $g_{K\Sigma N}/\sqrt{4\pi}$ di semua HFF cocok dengan prediksi SU(3). | 19 |

BAB 1

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Partikel kaon pertama kali diobservasi pada tahun 1947 pada eksperimen sinar kosmik. Partikel tersebut menarik perhatian karena diproduksi melalui reaksi yang melibatkan interaksi kuat, namun meluruh melalui interaksi lemah. Ternyata hal tersebut terjadi karena kaon mempunyai quark *strange*, diprediksi oleh Murray Gell-Mann dan Zweig pada tahun 1964, yang bilangan kuantumnya kekal pada interaksi kuat namun tidak kekal dalam interaksi lemah. Karena massa quark *strange* lebih berat dari quark *up* dan *down* yang ditemukan sebelumnya, quark *strange* menjadi unik dan ditangani secara berbeda. Keunikannya ini membuat quark *strange* berkontribusi banyak dalam pengembangan Model Standard. Kaon digolongkan ke dalam golongan meson, yaitu golongan partikel yang terdiri dari satu quark dan satu antiquark.

Saat ini partikel kaon sudah dapat diproduksi melalui berbagai macam reaksi, salah satunya adalah dengan cara fotoproduksi pada nukleon. Fotoproduksi merupakan reaksi hamburan antara foton dengan suatu partikel yang menghasilkan partikel lain di akhir reaksi. Fotoproduksi adalah kasus khusus dari elektroproduksi dimana foton pada fotoproduksi merupakan foton real, sedangkan pada elektroproduksi digunakan hamburan elektron yang dapat bertindak sebagai foton virtual seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.1.

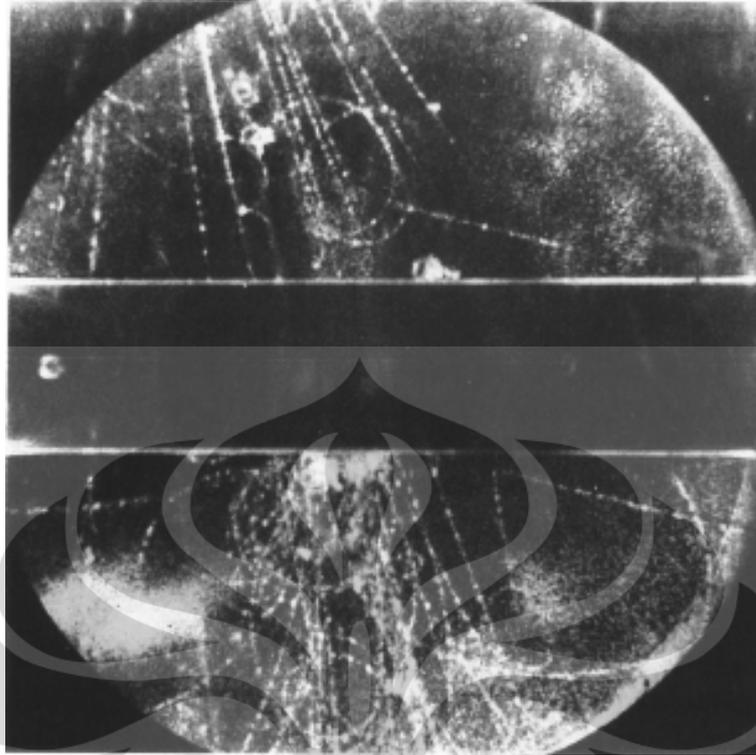
Perbedaan foton riil dengan foton virtual dapat dilihat dari persamaan berikut

$$\vec{k} \cdot \vec{\epsilon} = k_0 \epsilon_0 \quad (1.1)$$

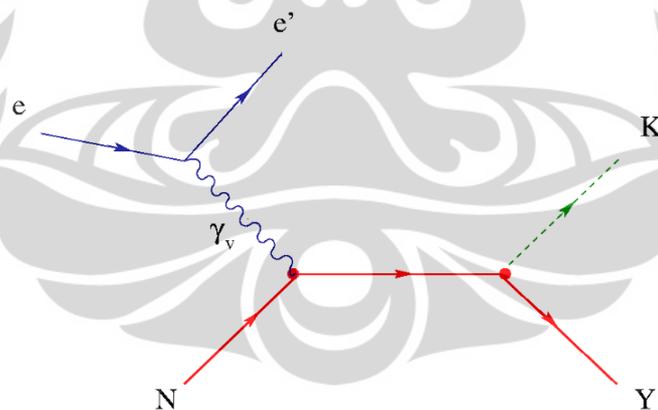
dimana pada foton riil energi $\epsilon_0 = 0$ sehingga $\vec{k} \cdot \vec{\epsilon} = 0$ yang berarti bahwa gelombangnya berorientasi secara tegak lurus dengan perambatan energinya. Contoh foton riil adalah cahaya tampak yang biasa dilihat pada kehidupan sehari-hari. Seperti yang sudah diketahui, cahaya tampak merupakan gelombang transversal yang arah osilasinya tegak lurus dengan arah perambatan energinya. Sedangkan pada foton virtual energi $\epsilon_0 \neq 0$ yang artinya adalah osilasi gelombang tidak tegak lurus dengan arah perambatan energinya. Hal ini hanya terjadi pada foton virtual.

Dalam elektroproduksi momentum foton virtual adalah

$$k = p' - p \quad (1.2)$$



Gambar 1.1: Partikel kaon pertama kali diobservasi. Kaon meluruh menjadi partikel pion dan membentuk seperti huruf V terbalik pada pojok kanan bawah gambar [1].



Gambar 1.2: Elektron yang terhambur pada elektroproduksi dapat dianggap sebagai foton virtual.

dimana p adalah momentum elektron datang, p' momentum elektron terhambur, dan k momentum foton virtual.

Dibandingkan dengan produksi meson lain, misalnya pion, produksi kaon menarik untuk dipelajari karena kaon mempunyai quark (atau antiquark) *strange* yang ter-

cipta dari nukleon (proton atau neutron) yang tidak memiliki quark (atau antiquark) *strange* di dalamnya. Sehingga konsekuensi dari produksi kaon dari nukleon adalah diproduksinya partikel lain selain kaon yang memiliki antiquark (atau quark) *strange* supaya reaksi fotoproduksi memenuhi kekekalan bilangan kuantum *strangeness*. Partikel yang diproduksi bersama kaon itu adalah hiperon. Sifat unik nukleus hiperon, yaitu inti atom yang mengandung hiperon, yang tidak mematuhi larangan Pauli membuat penelitian tentang produksi kaon dan hiperon menarik untuk dipelajari.

Dalam penelitian ini digunakan faktor bentuk hadronik yang terletak pada verteks. Penggunaan faktor bentuk hadronik disebabkan karena reaksi fotoproduksi kaon ini melibatkan partikel-partikel non-elementer, yaitu partikel yang masih tersusun atas partikel lain, sehingga tidak dapat dianggap sebagai partikel titik. Sementara itu untuk partikel titik, faktor bentuk hadroniknya sama dengan 1. Kegunaan faktor bentuk ini juga untuk membantu mengatasi divergensi yang terjadi ketika energi makin tinggi yang terjadi jika menggunakan metode partikel titik.

1.2 Perumusan Masalah

Selain keuntungan penggunaan faktor bentuk yang telah disebutkan sebelumnya, faktor bentuk ternyata menimbulkan beberapa masalah antara lain:

- Faktor bentuk hadronik menyebabkan terlalu teredamnya penampang lintang pada sudut depan kaon [2]. Model dengan faktor bentuk tidak sukses mereproduksi hasil eksperimen. Model tanpa faktor bentuk justru lebih sesuai dengan hasil eksperimen.
- Terdapat berbagai macam bentuk fungsi faktor bentuk yang dipakai orang serta tidak diketahui pasti fungsi mana yang sesuai dengan eksperimen.

Penelitian ini akan membahas masalah-masalah tersebut.

1.3 Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian teori dengan metode analitik dan numerik. Digunakan diagram Feynman *tree-level* dan perhitungan pseudoskalar untuk menghitung amplitudo secara analitik. Selanjutnya untuk mendapatkan nilai-nilai observabel seperti diferensial dan total penampang lintang (*cross section*) serta polarisasi digunakan perhitungan secara numerik. Fungsi faktor bentuk dimasukkan ke dalam program numerik. Digunakan berbagai macam bentuk fungsi faktor bentuk hadronik serta tanpa faktor bentuk sebagai perbandingan.

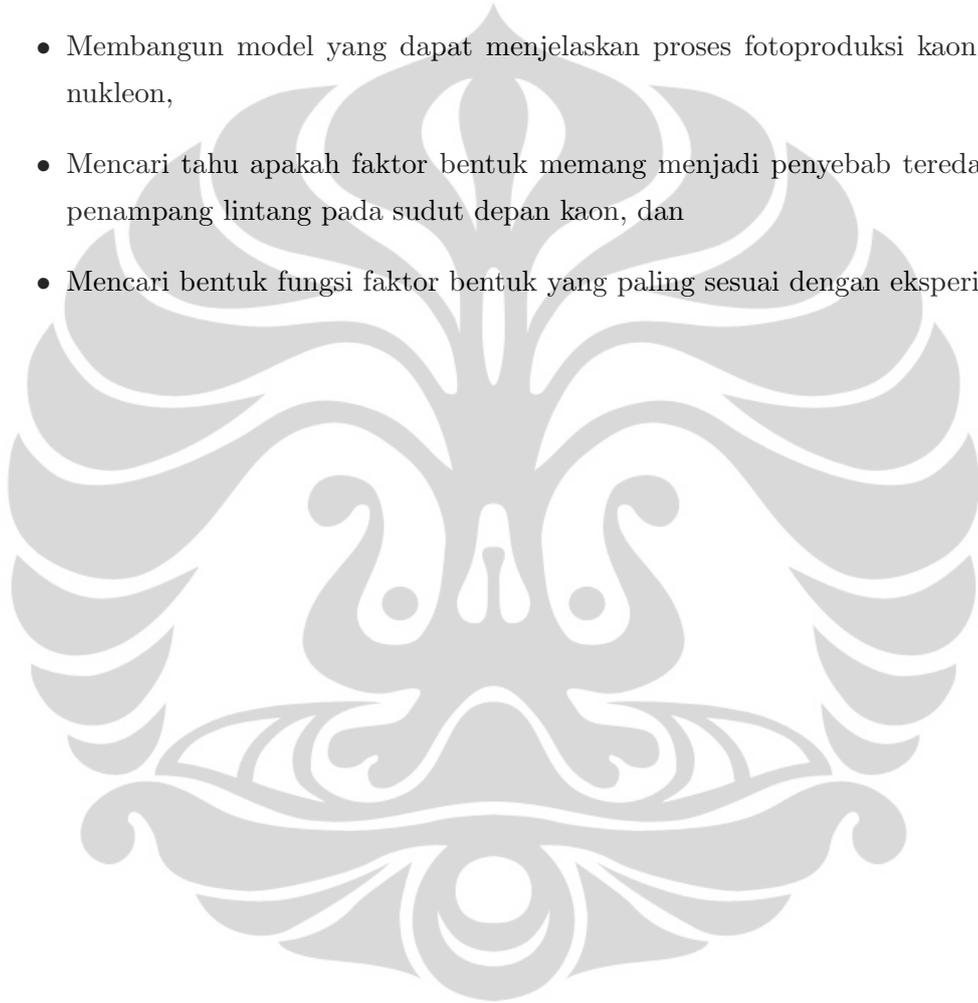
Hasil yang didapatkan dari perhitungan teoritik akan dibandingkan dengan data eksperimen yang berasal dari kolaborasi CLAS [3] [4], LEPS [5], dan GRAAL [6].

Perbandingan antara teori dan eksperimen akan ditampilkan dalam nilai chi kuadrat serta di dalam grafik. Semakin kecil nilai chi kuadrat, maka semakin cocok antara teori dengan eksperimen. Terdapat beberapa parameter yang nilainya diubah-ubah secara manual untuk mendapatkan nilai chi kuadrat terkecil.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- Membangun model yang dapat menjelaskan proses fotoproduksi kaon pada nukleon,
- Mencari tahu apakah faktor bentuk memang menjadi penyebab teredamnya penampang lintang pada sudut depan kaon, dan
- Mencari bentuk fungsi faktor bentuk yang paling sesuai dengan eksperimen.

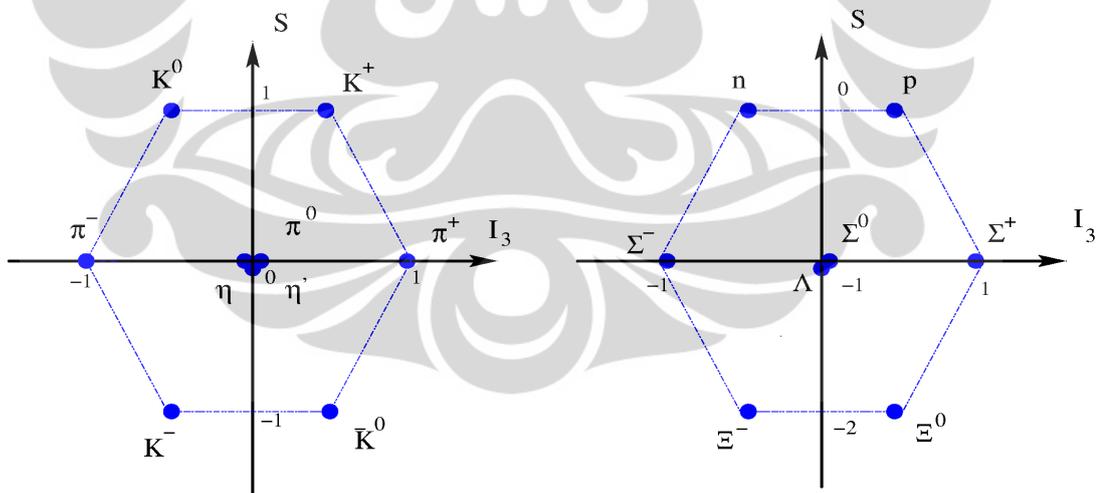


BAB 2

Formalisme Fotoproduksi Kaon pada Nukleon

Pada pendahuluan telah disebutkan bahwa kaon diproduksi dari nukleon pada fotoproduksi. Karena semua reaksi harus memenuhi kekekalan bilangan kuantum dan karena nukleon mempunyai bilangan kuantum *strangeness* sama dengan nol, maka kaon yang mempunyai quark *strange* (*antistrange*) harus diproduksi bersama hiperon yang mempunyai quark *antistrange* (*strange*) demi memenuhi kekekalan bilangan quantum *strangeness*.

Muncul pertanyaan mengapa quark *strange* dan *antistrange* dapat muncul dari nukleon yang tidak memiliki quark *strange* dan *antistrange*. Diduga di dalam neutron dan proton terdapat lautan quark *strange* dan *antistrange* yang diproduksi dan saling menganihilasi dalam waktu yang sangat singkat. Lautan quark *strange* dan *antistrange* tersebut tetap membuat bilangan kuantum *strangeness* milik nukleon tetap bernilai nol. Sehingga dapat dihasilkan quark *strange* dan *antistrange* dari nukleon. Dapat dilihat dari diagram isospin pada gambar 2.1. Dari diagram meson nonet dan baryon oktet tersebut dapat dibentuk reaksi fotoproduksi kaon yang mungkin terjadi.



Gambar 2.1: Multiplet dari meson (kiri) dan baryon (kanan) berdasarkan isospin dan *strangeness*-nya.

Dengan memperhatikan kekekalan bilangan kuantum *strangeness*, isospin, serta muatan, dapat dibentuk 6 kanal isospin dari fotoproduksi kaon pada nukleon. Selain itu interaksi elektromagnetik menyebabkan isospin dalam reaksi yang melibatkan

elektron menjadi tidak kekal, sehingga dapat dibentuk 6 kanal fotoproduksi kaon pada nukleon yaitu,

$$\begin{aligned}
 \gamma + p &\longrightarrow K^+ + \Lambda, \\
 \gamma + p &\longrightarrow K^0 + \Sigma^+, \\
 \gamma + p &\longrightarrow K^+ + \Sigma^0, \\
 \gamma + n &\longrightarrow K^0 + \Lambda, \\
 \gamma + n &\longrightarrow K^+ + \Sigma^-, \\
 \gamma + n &\longrightarrow K^0 + \Sigma^0.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

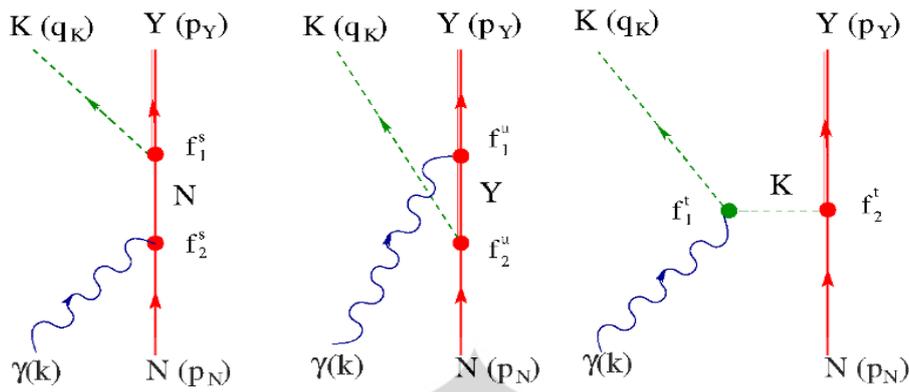
Dari keenam kanal di atas terbukti bahwa produksi kaon selalu menghasilkan partikel hiperon Λ atau Σ seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Hal tersebut terjadi dalam rangka reaksi harus mengkonservasi bilangan kuantum *strangeness*. Selain dari keenam reaksi tersebut, reaksi lainnya tidak mungkin terjadi karena melanggar kekekalan bilangan kuantum *strangeness*, kekekalan isospin, ataupun kekekalan muatan.

Metode teoretikal yang digunakan pada fotoproduksi kaon dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu energi rendah (sekitar di bawah 2 GeV) dan energi tinggi. Pada energi rendah biasa digunakan relasi dispersi, analisis multipol, atau model isobarik. Sedangkan untuk energi tinggi umumnya digunakan metode Regge-*pole* atau pendekatan quark-parton. Dalam penelitian ini model isobarik digunakan untuk mendapatkan amplitudo.

2.1 Model Isobarik

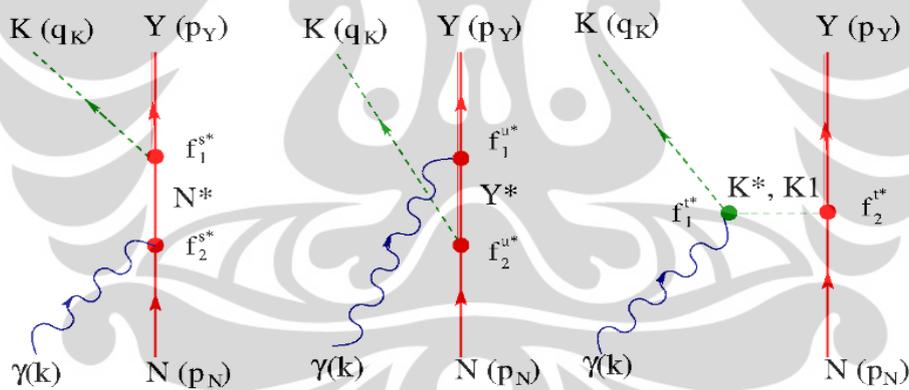
Pada model isobarik dikonstruksi operator Lorentz invariant dari diagram Feynman dengan kanal s, t, dan u. Di sini digunakan diagram *tree-level*. Suku Born direpresentasikan dalam diagram Feynman orde terendah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Kanal s pada suku Born merepresentasikan propagasi nukleon, kanal u pada suku Born merepresentasikan propagasi hiperon, dan kanal t pada suku Born merepresentasikan propagasi kaon.

Untuk keadaan partikel tereksitasi ditunjukkan oleh diagram Feynman dengan nukleon resonan dan partikel delta, hiperon resonan, dan kaon resonan masing-masing menjadi partikel propagasi berturut-turut pada kanal s, u, dan t seperti yang



Gambar 2.2: Diagram Feynman suku Born. Dari kiri ke kanan adalah kanal s, u, dan t.

ditunjukkan pada gambar 2.3. Partikel resonan merupakan partikel yang tereksitasi dari keadaan dasarnya ke level energi yang lebih tinggi. Bentuk diagramnya sama dengan suku Born, hanya partikel yang berpropagasi merupakan partikel resonan. Selain itu faktor verteks dan faktor propagasinya juga berbeda.



Gambar 2.3: Diagram Feynman untuk kontribusi partikel-partikel resonan. Dari kiri ke kanan adalah kanal s, u, dan t.

Dengan variabel Mandelstam s , t , dan u adalah

$$s = (k + p_N)^2, \quad t = (k - q_K)^2, \quad u = (k - p_Y)^2 \quad (2.2)$$

Di dalam diagram Feynman tersebut f merupakan faktor verteks. Di dalamnya mengandung konstanta kopling. Fungsi faktor verteks pada tiap verteks dan kanal berbeda-beda. Nantinya faktor verteks akan dikalikan dengan fungsi propagasi dan faktor verteks lain pada diagram yang sama untuk mengkonstruksi amplitudo.

2.2 Formulasi Perhitungan Amplitudo

Dari keenam reaksi yang mungkin pada persamaan 2.1, penelitian ini berfokus pada reaksi $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda$. Dari persamaan tersebut dibuat diagram Feynman dari suku Born dan resonan terms seperti pada gambar 2.2 dan 2.3 dengan nukleon N adalah proton p dan hiperon Y adalah partikel Λ . Digunakan teori pseudoskalar untuk menentukan fungsi faktor verteks yang ada di tiap verteks.

Amplitudo dibangun dengan mengapit fungsi propagasi dengan faktor-faktor verteks,

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_s &= f_1^s \mathcal{D}_s f_2^s \\ \mathcal{A}_u &= f_1^u \mathcal{D}_u f_2^u \\ \mathcal{A}_t &= f_1^t \mathcal{D}_t f_2^t \end{aligned} \quad (2.3)$$

dengan

f = fungsi faktor verteks

\mathcal{D} = propagator

Untuk kanal s pada keadaan dasar faktor verteks dan propagatornya adalah:

$$\begin{aligned} f_1^s &= ig_{K\Lambda N} \gamma_5 \\ f_2^s &= e \not{\epsilon} F_1^P + \mu_P i \sigma^{\mu\nu} \epsilon_\mu k_\nu F_2^P \\ \mathcal{D}_s &= \frac{\not{p} + \not{k} + m_P}{s - m_P^2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Sedangkan untuk kanal s pada keadaan tereksitasi dengan propagator N^* spin $+1/2$:

$$\begin{aligned} f_1^{s*} &= ig_{K\Lambda N^*} \gamma_5 \\ f_2^{s*} &= \mu_{N^*} i \sigma^{\mu\nu} \epsilon_\mu k_\nu F_2^N \\ \mathcal{D}_{s*} &= \frac{\not{p} + \not{k} + m_N - i\Gamma_{N/2}}{s - m_N^2 + im_N \Gamma_N} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Untuk kanal u pada keadaan dasar faktor verteks dan propagatornya adalah:

$$f_1^u = \mu_\Lambda i \sigma^{\mu\nu} \epsilon_\mu k_\nu F_2^\Lambda$$

$$f_2^u = ig_{K\Lambda N}\gamma_5$$

$$\mathcal{D}_u = \frac{\not{p}_\Lambda - \not{k} + m_\Lambda}{u - m_\Lambda^2} \quad (2.6)$$

dan untuk kanal u pada keadaan tereksitasi dengan propagator Σ^0 adalah:

$$f_1^{u*} = \mu_T i\sigma^{\mu\nu} \epsilon_\mu k_\nu F_2^\Lambda$$

$$f_2^{u*} = ig_{K\Sigma N}\gamma_5$$

$$\mathcal{D}_{u^*} = \frac{\not{p}_\Lambda - \not{k} + m_{\Sigma^0}}{u - m_{\Sigma^0}^2} \quad (2.7)$$

Untuk kanal t pada keadaan dasar faktor verteks dan propagatornya adalah:

$$f_1^t = e(2q - k) \cdot \epsilon F^K$$

$$f_2^t = ig_{K\Lambda N}\gamma_5$$

$$\mathcal{D}_t = \frac{1}{t - m_K^2} \quad (2.8)$$

untuk kanal t pada keadaan tereksitasi dengan propagator K^* adalah:

$$f_1^{t*} = \frac{g_{K^*K^*\gamma}}{M} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \epsilon^\nu k^\rho q^\sigma F^{K^*K}$$

$$f_2^{t*} = g_{K\Lambda P}^V \gamma^\mu + \frac{g_{K\Lambda P}^T}{m_P + m_\Lambda} i\sigma^{\mu\nu} (-(q - k)_\nu)$$

$$\mathcal{D}_{t^*} = \frac{-g_{\mu\nu} + \frac{\pi_\mu \pi_\nu}{m_{K^*}^2}}{t - m_{K^*}^2} \quad (2.9)$$

sedangkan untuk kanal t keadaan tereksitasi dengan propagator $K1$ adalah:

$$f_1^{t1} = e [k \cdot (q - k) \epsilon^\mu - \epsilon \cdot (q - k) k^\nu] F_{K1}$$

$$f_2^{t1} = g^V \gamma^\nu \gamma_5 + \frac{g^T}{m_\Lambda + m_P} (\not{p}_\Lambda - \not{p}) \gamma^\nu \gamma_5$$

$$\mathcal{D}_{t1} = \frac{1}{t - m_{K1}^2 + im_{K1}\Gamma_{K1}} \left[-g_{\mu\nu} + \frac{\pi_\mu \pi_\nu}{m_{K1}^2} \right] \quad (2.10)$$

Semua amplitudo tersebut harus memenuhi invarian tera (lihat lampiran A.1). Tidak semua amplitudo yang telah disebutkan di atas memenuhi invarian tera, sehingga suku Fubini-Nambu-Wathagin (FNW) harus ditambahkan ke dalam amplitudo tersebut untuk membuatnya menjadi invarian tera. Untuk mengetahui apakah amplitudo tersebut memenuhi invarian tera, amplitudo tersebut harus mengandung perkalian dengan matriks invarian Lorentz dan tera M_j dengan $j = 1, 2, \dots, 6$. Keenam matriks tersebut dapat dilihat di lampiran A.2.

Setelah didapatkan amplitudo, dilanjutkan dengan menghitung elemen matriks transisi. Matriks elemen dari fotoproduksi kaon mempunyai bentuk umum

$$\mathcal{M}_{fi} = \bar{u}_\Lambda(p_\Lambda) \mathcal{A}(s, t, u) u_P(p_P) \quad (2.11)$$

dengan syarat

$$\mathcal{A} = \sum_{j=1}^6 A_j(s, t, k^2) M_j \quad (2.12)$$

yang berarti amplitudo harus memenuhi gauge invarian. Elemen matriks transisi yang gauge invarian pada reaksi $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda$ dapat dilihat pada lampiran B. Elemen matriks transisi akan digunakan untuk menghitung penampang lintang dan besaran-besaran observabel lainnya.

2.3 Formulasi Perhitungan Observabel

Dari elemen matriks transisi dapat dihitung nilai penampang lintang. Secara umum bentuk penampang lintang untuk fotoproduksi kaon adalah,

$$\begin{aligned} d\sigma/d\Omega &\propto \sum_{spin} |\mathcal{A}|^2 \\ &\propto Tr(\mathcal{A}^\dagger \mathcal{A}) \\ &\propto \sum_{ij} A_i A_j Tr(M_i^\dagger M_j) \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\propto f(A_1, A_2, \dots, A_6) \quad (2.14)$$

berarti penampang lintang merupakan fungsi A_i

Setelah didapatkan penampang lintang, maka besaran-besaran observabel seperti polarisasi tunggal dan polarisasi ganda dapat dilakukan. Besaran polarisasi tunggal ada 3, yaitu

- Polarisasi asimetri lambda

$$P = \frac{d\sigma/d\Omega^{(+)} - d\sigma/d\Omega^{(-)}}{d\sigma/d\Omega^{(+)} + d\sigma/d\Omega^{(-)}} \quad (2.15)$$

- Polarisasi asimetri foton

$$\Sigma = \frac{d\sigma/d\Omega^{(\perp)} - d\sigma/d\Omega^{(\parallel)}}{d\sigma/d\Omega^{(\perp)} + d\sigma/d\Omega^{(\parallel)}} \quad (2.16)$$

- Polarisasi asimetri target

$$T = \frac{d\sigma/d\Omega^{(+)} - d\sigma/d\Omega^{(-)}}{d\sigma/d\Omega^{(+)} + d\sigma/d\Omega^{(-)}} \quad (2.17)$$

dengan tanda (+) adalah hadron terpolarisasi paralel dengan sumbu y, sedangkan (-) hadron terpolarisasi antiparalel dengan sumbu y. Tanda (\perp) adalah foton terpolarisasi tegak lurus terhadap bidang reaksi, sedangkan (\parallel) sejajar dengan bidang reaksi.

Selain polarisasi tunggal, terdapat polarisasi ganda. Polarisasi ganda terdiri dari 3 macam, yaitu

- Polarisasi *beam-target*,
- Polarisasi *beam-recoil*, dan
- Polarisasi *target-recoil*.

bentuk umum formulasinya adalah,

$$X = \frac{d\sigma/d\Omega^{(++)} - d\sigma/d\Omega^{(+-)}}{d\sigma/d\Omega^{(++)} + d\sigma/d\Omega^{(+-)}} \quad (2.18)$$

Dalam bab ini telah dibahas cara penurunan amplitudo untuk mendapatkan besaran observabel. Namun faktor bentuk hadronik belum dimasukkan ke dalam perhitungan di atas. Faktor bentuk hadronik letaknya di dalam perhitungan akan dibahas di dalam bab selanjutnya.

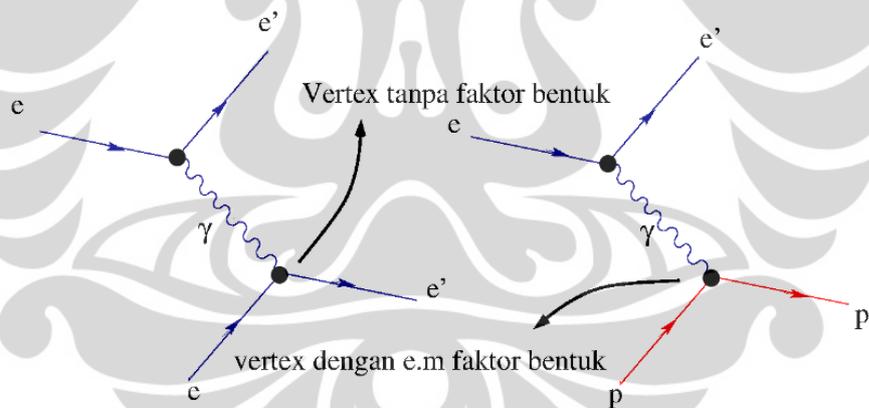
BAB 3

Faktor Bentuk Hadronik

Bab ini membahas tentang faktor bentuk hadronik. Berbagai macam faktor bentuk serta letaknya di dalam diagram Feynman dijelaskan dalam bab 3.1. Berbagai macam bentuk faktor bentuk hadronik yang digunakan di dalam penelitian ini dibahas dalam bab 3.2. Terakhir pada bab 3.3 dibahas tentang perhitungan amplitudo jika faktor bentuk hadronik diikutsertakan.

3.1 Pengertian Faktor Bentuk Hadronik

Pada hamburan elektron-elektron, verteks dari reaksi tersebut menghubungkan antara elektron dengan elektron. Tidak terjadi perubahan partikel di dalam verteks tersebut. Selain itu elektron merupakan partikel elementer dan tidak memiliki distribusi muatan, sehingga elektron dapat dianggap sebagai partikel titik. Partikel titik tidak membutuhkan penambahan faktor lain pada fungsi verteksnnya.

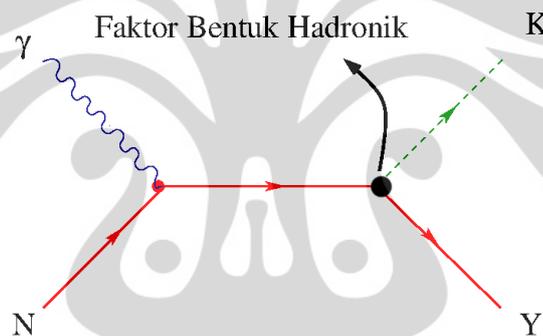


Gambar 3.1: Kiri: hamburan elektron-elektron tidak mempunyai faktor bentuk. Kanan: letak faktor bentuk elektromagnetik pada hamburan elektron-proton.

Pada hamburan elektron-proton terdapat verteks yang menghubungkan antara proton dengan proton. Tidak terjadi perubahan partikel di dalam verteks tersebut. Namun proton bukanlah partikel elementer, melainkan terdiri dari quark-quark (yang memiliki muatan) sehingga menghasilkan distribusi muatan di dalam proton. Akibatnya proton tidak dapat diperlakukan sebagai partikel titik, sehingga orang

menambahkan faktor bentuk elektromagnetik di dalam verteks proton-proton (dan ke dalam verteks yang menghubungkan partikel-partikel yang sama) akibat adanya distribusi muatan di dalam verteks tersebut.

Untuk verteks yang menghubungkan 2 partikel yang berbeda seperti pada verteks proton- N^* , di dalam verteks tersebut ditambahkan dengan faktor bentuk transisi karena terjadi perubahan antara proton menjadi N^* di dalam verteks tersebut. Untuk 3 partikel yang berbeda yang dihubungkan dalam satu verteks muncul ide untuk menggunakan suatu fungsi yang dapat mendeskripsikan distribusi partikel di dalam verteks tersebut. Fungsi tersebut kemudian diberi nama faktor bentuk hadronik, karena partikel-partikel di dalam verteks tersebut merupakan partikel hadron. Faktor bentuk hadronik merupakan fungsi dari momentum kuadrat partikel yang dihubungkan oleh verteks tersebut. Karena variabel Mandelstam s , t , dan u merupakan fungsi momentum kuadrat dari partikel yang bereaksi (lihat persamaan 2.2), faktor bentuk hadronik juga dapat merupakan fungsi dari variabel Mandelstam.



Gambar 3.2: Letak faktor bentuk hadronik pada reaksi $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda$ berada pada verteks yang menghubungkan proton, kaon, dan hiperon.

3.2 Macam-macam Bentuk Faktor Bentuk Hadronik

Telah diketahui bahwa faktor bentuk hadronik merupakan faktor variabel Mandelstam. Namun, tidak diketahui secara pasti bagaimana bentuk fungsi faktor bentuk tersebut. Dalam penelitian ini digunakan berbagai macam bentuk faktor bentuk hadronik yang pernah digunakan orang. Faktor bentuk tersebut antara lain

- Faktor bentuk monopol

$$F(x) = \frac{\Lambda^2 - m_x^2}{\Lambda^2 - x} \quad (3.1)$$

- Faktor bentuk dipol [7]

$$F(x) = \frac{\Lambda^4}{\Lambda^4 + (x - m_x^2)^2} \quad (3.2)$$

Faktor bentuk dipol paling sering digunakan oleh orang. Faktor bentuk ini merupakan perluasan dari bentuk monopol.

- Faktor bentuk Gaussian

$$F(x) = \exp\left\{-\frac{(x - m_x^2)^2}{\Lambda^4}\right\} \quad (3.3)$$

- Bentuk general [8]

$$F(x) = \frac{1}{1 + \left|x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2}\right| + \left|x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2}\right|^2 + \dots + \left|x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2}\right|^r} \quad (3.4)$$

Faktor bentuk ini dapat mereproduksi bentuk monopol dan dipol, hingga ke pangkat yang lebih tinggi lagi. Di penelitian ini digunakan dari nilai $r = 1$ hingga $r = 4$ dengan tujuan untuk mencari tahu apakah dengan semakin diperbesar pangkatnya, akan semakin bagus juga faktor bentuknya dalam menjelaskan eksperimen.

dengan x adalah variabel Mandelstam s , t , dan u , m_x adalah massa partikel propagator dari kanal s , t , atau u , dan Λ adalah parameter *cutoff*.

Untuk memudahkan di dalam penelitian ini digunakan penamaan HFF, yang merupakan singkatan dari *Hadronic Form Factor* atau faktor bentuk hadronik, untuk menyebut faktor bentuk khususnya di dalam tabel dan grafik supaya lebih mudah dan singkat. Penamaan singkat faktor bentuk ini dapat dilihat di dalam tabel 3.1.

Semua bentuk faktor bentuk yang disebutkan di atas akan mencapai nilai maksimum pada saat $x = m_x^2$ yaitu $F(m_x^2) = 1$ yang berarti sama dengan keadaan tanpa faktor bentuk. Nilai 1 merupakan nilai maksimum karena faktor bentuk hadronik berfungsi untuk meredam penampang lintang. Setiap faktor bentuk hadronik tersebut akan di fit dan dibandingkan hasilnya dengan data eksperimen dan dengan faktor bentuk lainnya. Tujuannya adalah untuk mencari faktor bentuk hadronik manakah dari bentuk di atas yang dapat cocok dengan hasil eksperimen.

3.3 Pemasukkan Faktor Bentuk Hadronik ke dalam Perhitungan

Pada bab 2 telah dilakukan perhitungan amplitudo, yaitu dengan cara mengalikan faktor verteks dan faktor propagasi. Saat faktor bentuk hadronik diikutsertakan, fungsi faktor bentuk tersebut dikalikan dengan fungsi verteks yang mengandung faktor bentuk hadronik. Sebagai contoh, inklusi faktor bentuk hadronik pada

Tabel 3.1: Faktor bentuk yang digunakan dalam penelitian. Digunakan penamaan yang lebih singkat untuk macam-macam faktor bentuk yang digunakan di dalam penelitian ini.

| Penamaan | Jenis faktor bentuk |
|----------|-------------------------|
| HFF 1 | Tanpa faktor bentuk |
| HFF 2 | Monopol |
| HFF 3 | Dipol |
| HFF 4 | Gaussian |
| HFF 5 | Bentuk general, $r = 1$ |
| HFF 6 | Bentuk general, $r = 2$ |
| HFF 7 | Bentuk general, $r = 3$ |
| HFF 8 | Bentuk general, $r = 4$ |

kanal s Born terms adalah,

$$\mathcal{A}_{s_{HFF}} = (f_1^s F(s)) \mathcal{D}_s f_2^s. \quad (3.5)$$

Karena faktor bentuk hadronik hanya berupa angka, maka faktor bentuk hadronik dapat langsung dikalikan dengan amplitudo,

$$\mathcal{A}_{s_{HFF}} = \mathcal{A}_s F(s). \quad (3.6)$$

Selain itu, memasukkan faktor bentuk hadronik ke dalam amplitudo tidak merusak invarian tera pada amplitudo tersebut karena faktor bentuk hadronik hanya berupa konstanta.

BAB 4

Pengolahan dan Analisis Teori

Setelah amplitudo didapatkan dari perhitungan pada bab 2, digunakan metode numerik untuk menghitung nilai-nilai observabel. Pada bab 4.1 akan dijelaskan tentang cara mendapatkan nilai-nilai observabel khususnya mencari tahu kecocokan antara data eksperimen dengan teori. Pada bab 4.2 berisi hasil dan analisis dari penelitian.

4.1 *Fitting Program*

Perhitungan numerik menggunakan program Fortran untuk menghitung nilai observabel pada teori. Kemudian nilai tersebut dibandingkan dengan nilai observabel dari data eksperimen yang didapat dari CLAS, GRAAL, dan LEPS. Karena data point yang digunakan sangat banyak, akan sangat merepotkan jika harus membandingkan nilai teori dengan eksperimen satu per satu di tiap data *point*. Maka untuk mencari kecocokan antara teori dengan eksperimen dicari nilai chi kuadrat. Besar nilai chi kuadrat adalah,

$$\frac{\chi^2}{N} = \frac{1}{N_{max} - N_{par}} \sum_{i=1}^{N_{max}} \left[\frac{\sigma_i^{exp} - \sigma_i^{th}}{\Delta\sigma_i^{exp}} \right]^2 \quad (4.1)$$

dengan

N_{max} = jumlah data point,

N_{par} = jumlah parameter,

σ_i^{exp} = Nilai besaran observabel eksperimen,

σ_i^{th} = Nilai besaran observabel teori,

$\Delta\sigma_i^{exp}$ = ketidakpastian statistik.

Semakin kecil nilai chi kuadrat berarti bahwa teori cocok dengan eksperimen. Namun untuk mendapatkan $\frac{\chi^2}{N} = 0$, yang berarti hasil teori dan eksperimen sama persis, merupakan hal yang hampir mustahil. Nilai chi kuadrat mendekati 1 itu sudah cukup untuk membuktikan kalau teori cocok dengan eksperimen, karena hal itu berarti data eksperimen tersebar di dekat nilai teori.

Untuk memeriksa pengaruh faktor bentuk terhadap reaksi ini, seluruh faktor bentuk yang telah disebutkan dalam tabel 3.1 pada bab 3 dihitung dalam perhitungan numerik. Sebagai perbandingan, reaksi tanpa faktor bentuk juga dihitung.

Tabel 4.1: Nilai chi kuadrat dari tiap bentuk faktor bentuk hadronik diurutkan sesuai tabel 3.1. Dapat dilihat bahwa nilai chi kuadrat jika diurutkan dari yang terkecil hingga yang terbesar adalah bentuk general orde 4, bentuk general orde 3, bentuk dipol, bentuk general orde 2, bentuk Gaussian, bentuk general orde 1, bentuk monopol, dan tanpa faktor bentuk.

| No. | Jenis Faktor Bentuk Hadronik | $\frac{\chi^2}{N}$ |
|-----|------------------------------|--------------------|
| 1. | Tanpa faktor bentuk | 5.67 |
| 2. | Monopol | 4.95 |
| 3. | Dipol | 2.85 |
| 4. | Gaussian | 4.13 |
| 5. | Bentuk general orde 1 | 4.64 |
| 6. | Bentuk general orde 2 | 2.88 |
| 7. | Bentuk general orde 3 | 2.84 |
| 8. | Bentuk general orde 4 | 2.74 |

Nantinya akan diperiksa nilai chi kuadrat dari bentuk faktor bentuk hadronik manakah yang paling rendah atau paling sesuai dengan data eksperimen.

Untuk mendapatkan nilai chi kuadrat terkecil, harga dari parameter-parameter perlu diubah-ubah. Setelah dilakukan perhitungan numerik nantinya akan didapatkan nilai konstanta kopling dari tiap dari tiap faktor bentuk yang digunakan. Perubahan nilai parameter dilakukan pada tiap bentuk faktor bentuk hadronik.

4.2 Hasil dan Analisis

Dari *fitting* program didapatkan nilai chi kuadrat untuk setiap faktor bentuk hadronik yang digunakan. Nilai chi kuadrat tersebut ditunjukkan pada tabel 4.1. Dari tabel tersebut tampak bahwa nilai chi kuadrat pada perhitungan tanpa faktor bentuk adalah yang paling besar dibandingkan dengan perhitungan yang menggunakan faktor bentuk. Sementara chi kuadrat terendah didapatkan oleh faktor bentuk general dengan pangkat r berorde 4.

$$F(x) = \frac{1}{1 + \left|x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2}\right| + \left|x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2}\right|^2 + \left|x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2}\right|^3 + \left|x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2}\right|^4} \quad (4.2)$$

Perhatikan juga bahwa dengan dinaikkannya orde pangkat dari faktor bentuk general membuat nilai chi kuadrat semakin rendah. Kemungkinan besar jika orde pangkatnya dinaikkan lagi, nilai chi kuadrat yang didapat bisa semakin rendah lagi.

Tabel 4.2: Nilai konstanta kopling (CC) dalam setiap faktor bentuk hadronik. HFF 1 tidak memakai faktor bentuk hadronik, HFF 2 memakai faktor bentuk monopol, HFF 3 memakai faktor bentuk dipol, dan HFF 4 memakai faktor bentuk Gaussian. Nilai-nilai konstanta kopling Kaon-Lambda-Nukleon ($g_{K\Lambda N}/\sqrt{4\pi}$) dan konstanta kopling Kaon-Sigma-Nukleon $g_{K\Sigma N}/\sqrt{4\pi}$ di semua HFF cocok dengan prediksi SU(3).

| CC | HFF 1 | HFF 2 | HFF 3 | HFF 4 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| $g_{K\Lambda N}/\sqrt{4\pi}$ | -4.398 | -4.400 | -3.115 | -3.000 |
| $g_{K\Sigma N}/\sqrt{4\pi}$ | 0.902 | 0.900 | 0.900 | 0.900 |
| $G_{K^*}^V/4\pi$ | -1.866 | 0.080 | -0.683 | -0.149 |
| $G_{K^*}^T/4\pi$ | -4.332 | 1.711 | 4.263 | 2.019 |
| $g_{N4}/\sqrt{4\pi}$ | -1.690 | 0.009 | -0.163 | -0.069 |
| $g_{N51}/\sqrt{4\pi}$ | 7.260 | -0.163 | -0.148 | -0.107 |
| $g_{N52}/\sqrt{4\pi}$ | 5.494 | -0.065 | -0.009 | -0.082 |
| $g_{N6}/\sqrt{4\pi}$ | 8.147 | -0.247 | 0.0619 | -0.126 |
| $g_{N71}/4\pi$ | -3.796 | -0.098 | 0.122 | 0.166 |
| $g_{N72}/4\pi$ | -0.208 | 0.060 | 0.401 | 0.163 |
| $g_{N81}/4\pi$ | 10.947 | 0.536 | 0.020 | 0.024 |
| $g_{N82}/4\pi$ | 7.352 | 0.252 | -0.002 | -0.033 |
| $g_{N91}/4\pi$ | 1.066 | 0.014 | 0.012 | 0.043 |
| $g_{N92}/4\pi$ | -4.242 | 0.128 | 0.577 | 0.979 |
| $g_{N10}/4\pi$ | 3.408 | -0.015 | -0.060 | -0.056 |
| $g_{N11}/4\pi$ | 1.246 | -0.012 | -0.027 | -0.021 |
| $g_{N12}/4\pi$ | -3.878 | -0.223 | -0.569 | -0.104 |

Dari chi kuadrat ini dapat dilihat bahwa dengan memasukkan faktor bentuk hadronik ke dalam perhitungan dapat menghasilkan kecocokan yang lebih baik dengan data eksperimen dibandingkan dengan tanpa faktor bentuk hadronik. Namun terdapat bentuk faktor bentuk hadronik yang nilai chi kuadratnya tidak begitu bagus, yaitu bentuk monopol, bentuk Gaussian dan bentuk general orde 1,

$$F(x) = \frac{1}{1 + \left| x - \frac{m_x^2}{\Lambda^2} \right|} \quad (4.3)$$

Selain itu didapatkan juga nilai konstanta kopling seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2 dan 4.3. Seluruh nilai konstanta kopling $g_{K\Lambda N}/\sqrt{4\pi}$ sesuai dengan prediksi SU(3), yaitu antara -4.4 sampai -3.0. Nilai konstanta kopling $g_{K\Sigma N}/\sqrt{4\pi}$ yang sesuai

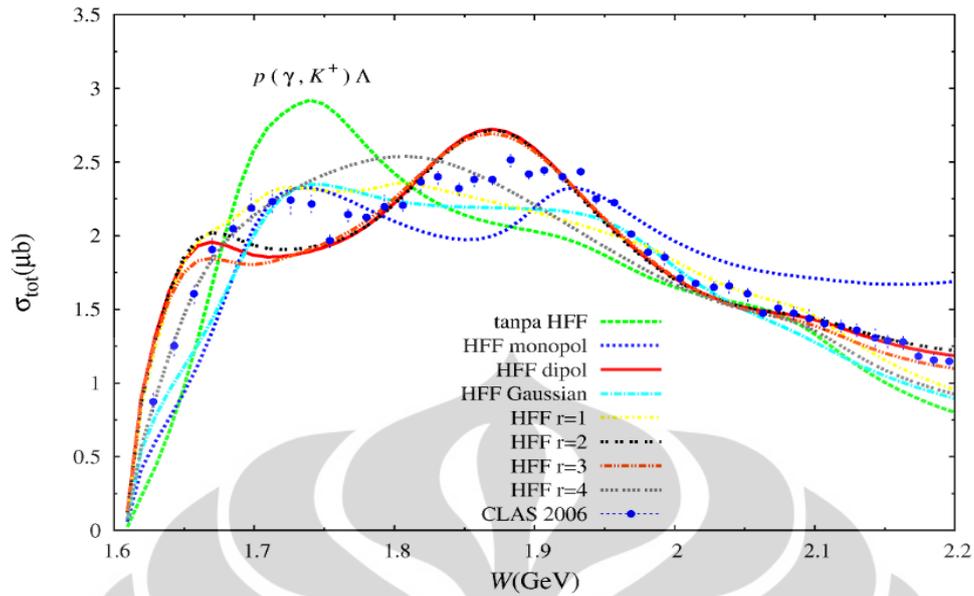
Tabel 4.3: Nilai konstanta kopling (CC) dalam setiap faktor bentuk hadronik general. Dengan HFF 5 merupakan orde 1, HFF 6 adalah orde 2, HFF 7 adalah orde 3, dan HFF 8 adalah orde 4. Nilai-nilai konstanta kopling Kaon-Lambda-Nukleon ($g_{K\Lambda N}/\sqrt{4\pi}$) dan konstanta kopling Kaon-Sigma-Nukleon $g_{K\Sigma N}/\sqrt{4\pi}$ di semua HFF cocok dengan prediksi SU(3).

| CC | HFF 5 | HFF 6 | HFF 7 | HFF 8 |
|------------------------------|----------|--------|---------|--------|
| $g_{K\Lambda N}/\sqrt{4\pi}$ | -3.000 | -4.400 | -3.000 | -4.400 |
| $g_{K\Sigma N}/\sqrt{4\pi}$ | 0. 1.300 | 0.900 | 0.900 | 0.900 |
| $G_{K^*}^V/4\pi$ | -0.270 | -1.063 | -0.502 | -0.679 |
| $G_{K^*}^T/4\pi$ | -0.220 | 5.848 | 3.063 | 3.944 |
| $g_{N4}/\sqrt{4\pi}$ | 0.169 | -0.169 | -0.150 | 0.156 |
| $g_{N51}/\sqrt{4\pi}$ | -0.004 | -0.127 | -0.156 | -0.015 |
| $g_{N52}/\sqrt{4\pi}$ | -0.018 | -0.084 | -0.096 | -0.054 |
| $g_{N6}/\sqrt{4\pi}$ | 0.387 | 0.075 | 0.024 | 0.121 |
| $g_{N71}/4\pi$ | -0.092 | 0.111 | 0.138 | -0.010 |
| $g_{N72}/4\pi$ | -0.935 | 0.404 | 0.382 | -0.464 |
| $g_{N81}/4\pi$ | 0.042 | 0.012 | 0.033 | -0.208 |
| $g_{N82}/4\pi$ | 0.009 | -0.003 | -0.002 | -0.105 |
| $g_{N91}/4\pi$ | 0.439 | 0.009 | 0.018 | 0.234 |
| $g_{N92}/4\pi$ | 1.915 | 0.550 | 0.640 | 1.022 |
| $g_{N10}/4\pi$ | -0.105 | -0.056 | -0.0619 | -0.084 |
| $g_{N11}/4\pi$ | -0.028 | -0.024 | -0.030 | -0.042 |
| $g_{N12}/4\pi$ | -0.506 | -0.647 | -0.505 | -0.363 |

prediksi SU(3) antara +0.9 smapai +1.3 juga dipenuhi oleh HFF 1 hingga HFF 8.

Selain dari perbandingan nilai chi kuadrat, digunakan juga grafik untuk menganalisis efek penggunaan tiap faktor bentuk pada differensial cross section, total cross section, polarisasi Λ , dan polarisasi foton.

Dari gambar 4.1 dapat dilihat penampang lintang total dari masing-masing faktor bentuk serta data eksperimennya. Grafik yang tidak menggunakan faktor bentuk hadronik (garis warna hijau) cukup sesuai dengan data eksperimen pada energi di bawah 1.7 GeV. Namun setelah energinya di atas 1.7 GeV penampang lintang totalnya tidak sesuai lagi dengan data eksperimen, kecuali dengan beberapa titik data di energi 2 GeV. Selanjutnya pada grafik faktor bentuk monopol penampang lintang totalnya cukup sesuai dengan data eksperimen hingga 1.8 GeV, namun selebihnya faktor bentuk ini tidak cocok dan mengalami divergensi ketika energi makin tinggi.

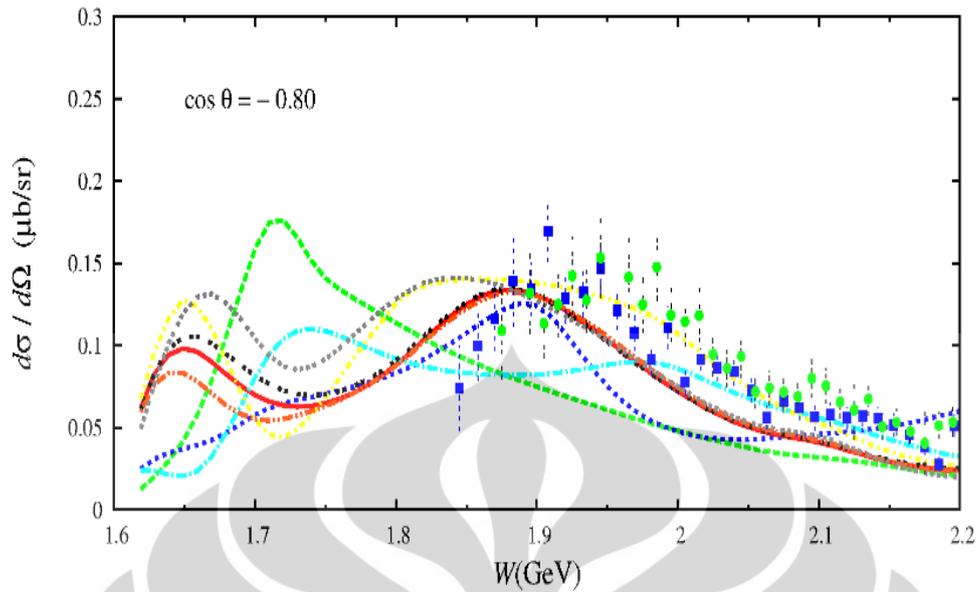


Gambar 4.1: Grafik penampang lintang total dari reaksi $\gamma + p \longleftrightarrow K^+ + \Lambda$ dengan memasukkan berbagai macam bentuk faktor bentuk hadronik. Penampang lintang total teori dibandingkan dengan data eksperimen dari CLAS 2006. Terlihat bahwa faktor bentuk dipol serta faktor bentuk general orde 2 dan 3 cocok dengan data eksperimen di energi lebih besar dari 1.8 GeV.

Masih di gambar yang sama, faktor bentuk dipol serta faktor bentuk general orde 2 dan orde 3 grafiknya berhimpitan. Ketiganya cocok dengan data eksperimen pada energi yang rendah dan energi yang tinggi, tetapi tidak dapat mereproduksi puncak yang dibentuk oleh hasil eksperimen pada energi 1.7 GeV dan 1.85 GeV. Faktor bentuk Gaussian dan faktor bentuk general orde 1 juga cukup bagus dalam mereproduksi data, kecuali pada energi 1.9 GeV. Sedangkan faktor bentuk general orde 4 tidak dapat mereproduksi data mulai dari energi 1.7 hingga 1.9 GeV.

Secara garis besar, semua grafik hasil perhitungan teori di atas tidak sesuai dengan data eksperimen pada energi 1.7 hingga 1.9 GeV. Namun 3 diantaranya, yaitu faktor bentuk dipol dan faktor bentuk general orde 2 dan 3 dapat digunakan pada energi yang lebih tinggi dari 1.8 GeV karena sangat sesuai dengan data eksperimen tersebut. Sementara untuk energi di bawah 1.8 GeV faktor bentuk monopol dan Gaussian cukup sesuai dengan data. Perlu dicari lagi bentuk fungsi faktor bentuk yang dapat mereproduksi penampang lintang total dari data eksperimen tersebut. Mungkin fungsinya merupakan gabungan antara fungsi faktor bentuk-faktor bentuk di atas.

Gambar 4.2 merupakan grafik penampang lintang pada sudut belakang kaon. Di sini sebagian besar grafik yang menggunakan faktor bentuk cocok dengan da-

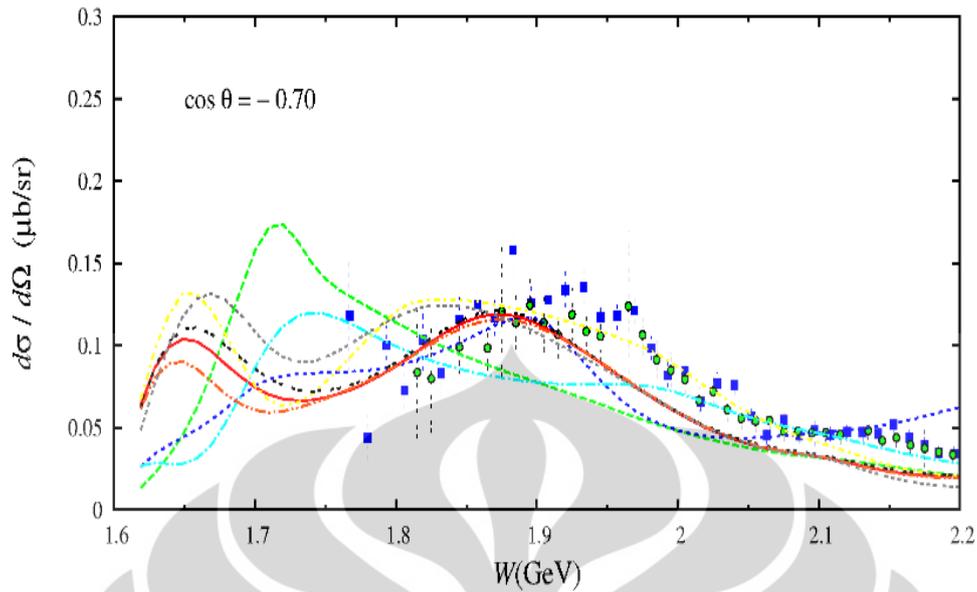


Gambar 4.2: Penampang lintang pada sudut belakang kaon. Data point biru dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.

ta eksperimen. Grafik yang tidak sesuai dengan data eksperimen adalah yang menggunakan faktor bentuk Gaussian (garis biru muda) dan monopol (garis biru tua). Sementara itu grafik yang tidak memakai faktor bentuk hadronik mengalami peredaman dan sama sekali tidak sesuai dengan data eksperimen. Sekali lagi terlihat bahwa 3 grafik yang menggunakan faktor bentuk dipol (garis merah), faktor bentuk general orde 2 (garis oranye), dan orde 3 (garis hitam) berhimpitan di sepanjang grafik. Ketiganya juga terlihat paling cocok dengan data penampang lintang pada sudut ini dibandingkan dengan faktor bentuk lainnya.

Saat nilai sudut dinaikkan, di gambar 4.3 terlihat bahwa penampang lintangnya tiap grafik tampak lebih sejajar, khususnya pada energi lebih tinggi. Grafik-grafik yang memakai faktor bentuk hadronik Gaussian dan monopol bahkan grafik yang tidak memakai faktor bentuk juga mulai mendekati nilai data eksperimen.

Semakin menuju ke sudut tengah seperti yang terlihat pada gambar 4.4, bentuk penampang lintang dari grafik-grafik tersebut semakin sejajar. Memasuki sudut tengah, hampir semua grafik yang menggunakan ataupun tidak menggunakan faktor bentuk sama-sama cocok dengan nilai penampang lintang eksperimen pada energi di atas 1.9 GeV. Satu-satunya faktor bentuk yang tidak sesuai adalah bentuk monopol.

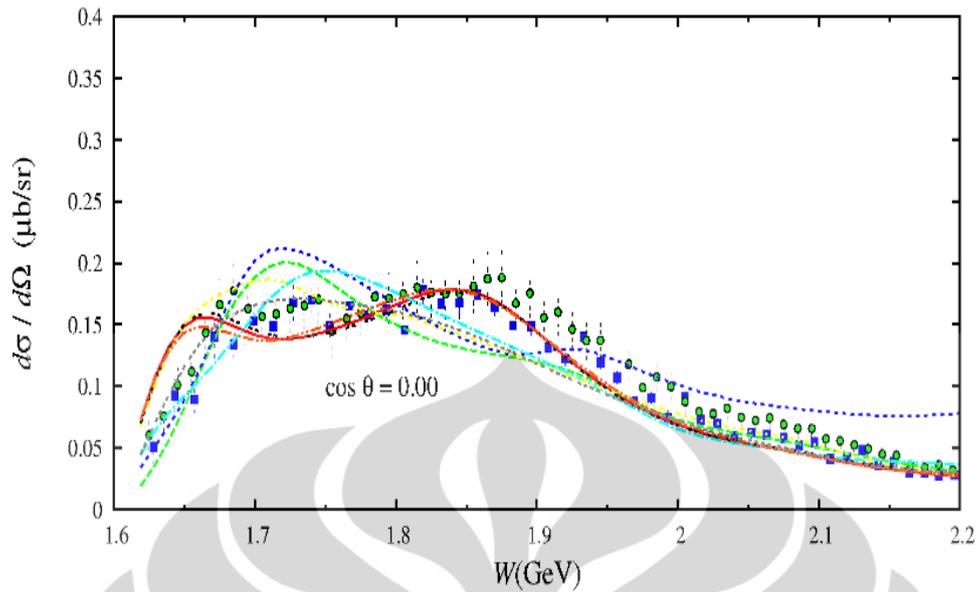


Gambar 4.3: Penampang lintang pada $\cos \theta = -70^\circ$. Masih di sekitar sudut belakang kaon. Data point biru dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.

Di sini terdapat 3 grafik yang sangat bagus yaitu faktor bentuk dipol, general orde 2, dan 3 yang benar-benar dapat mereproduksi data di semua jangkauan energi yang digunakan dalam eksperimen.

Mulai memasuki sudut depan kaon seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5, grafik-grafik mulai terlihat tidak teratur. Bahkan lebih tidak teratur dibandingkan dengan sudut belakang. Walaupun demikian, semua grafik masih sesuai dengan data eksperimen pada energi di atas 1.9 GeV. Hanya faktor bentuk general orde pertama yang terlihat cukup sesuai dengan data eksperimen di sepanjang wilayah energi. Walaupun grafik sudut depan pada gambar 4.6 tampak tidak teratur, namun sebagian besar dari grafik tersebut masih sesuai dengan data eksperimen karena nilai ketidakpastian dari data tersebut cukup besar. Hanya ada dua grafik yang tidak sesuai dengan data, yaitu grafik tanpa faktor bentuk dan grafik dengan faktor bentuk monopol.

Selain itu di sudut depan ini tidak terjadi peredaman penampang lintang saat energi dinaikkan pada grafik dengan faktor bentuk hadronik. Hal ini berarti bahwa peredaman penampang lintang akibat memasukkan faktor bentuk hadronik ke dalam perhitungan tidak terbukti. Faktor bentuk hadronik justru membuat hasil

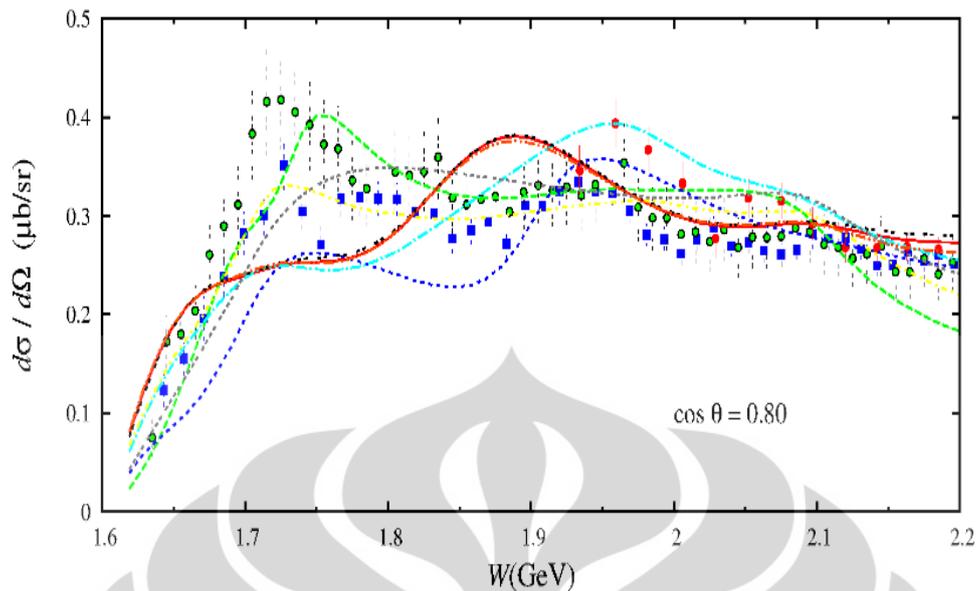


Gambar 4.4: Penampang lintang sudut tengah. Data point biru dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.

perhitungan dalam penelitian ini lebih sesuai dengan data eksperimen dibandingkan dengan tanpa menggunakan faktor bentuk hadronik.

Selain grafik penampang lintang, ditampilkan juga grafik polarisasi foton pada gambar 4.7. Pada energi 1.9465 dan 1.9942 GeV sebagian besar grafik dapat mengikuti hasil eksperimen. Namun saat energi naik menjadi 2.0407 GeV hanya tinggal grafik milik faktor bentuk Gaussian (biru muda) yang mengikuti grafik data eksperimen. Pada energi 2.1957 GeV tidak ada grafik teori yang mengikuti nilai data eksperimen. Grafik-grafik kemudian mengikuti nilai data eksperimen kembali pada energi 2.1957 GeV, kecuali grafik dengan bentuk monopol (biru tua) dan grafik tanpa faktor bentuk hadronik (hijau). Keduanya tetap tidak sesuai dengan data eksperimen ketika energi naik lagi menjadi 2.2796, sementara grafik-grafik lainnya justru makin sesuai dengan data eksperimen.

Pada polarisasi Λ di gambar 4.8 grafik pada sudut $\cos \theta = 0$ sulit untuk dianalisis, karena data eksperimennya terlalu sedikit. Sedangkan untuk sudut $\cos \theta = -0.5$ sebagian besar grafik memiliki bentuk yang hampir sama dengan data eksperimen, walaupun nilainya terlalu tinggi atau terlalu rendah. Pada $\cos \theta = 0.5$ grafik dengan faktor bentuk cukup berhasil mereproduksi hasil eksperimen dibandingkan dengan grafik yang tanpa faktor bentuk. Grafik yang paling sesuai dengan eksperimen pada



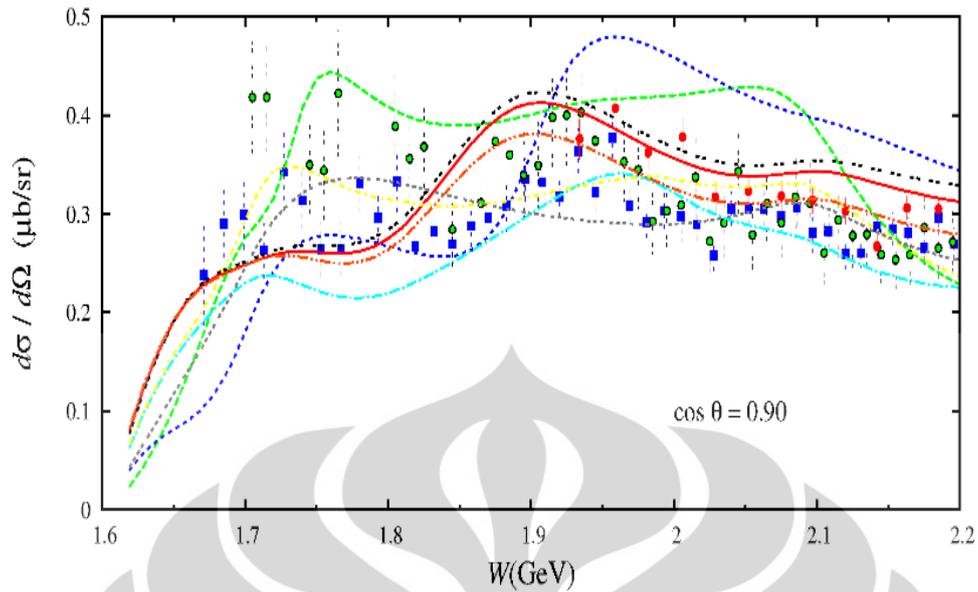
Gambar 4.5: Penampang lintang mulai tidak teratur saat mulai memasuki sudut depan kaon. Data point biru, merah, dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.

sudut ini adalah milik faktor bentuk Gaussian (biru muda) yang sukses mereproduksi data eksperimen di sepanjang jangkauan energi.

Pada polarisasi Λ terhadap sudut di energi 1.674 GeV (gambar 4.9) grafik yang cocok dengan data eksperimen adalah milik faktor bentuk monopol dan grafik tanpa faktor bentuk hadronik. Saat energi semakin naik, grafik-grafik yang lain ikut membentuk lengkungan seperti pada grafi faktor bentuk monopol dan grafik tanpa faktor bentuk, seperti yang terlihat pada gambar 4.10. Di energi 1.809 GeV tersebut polarisasi pada teori paling sesuai dengan data eksperimen dibandingkan pada saat di wilayah energi lain.

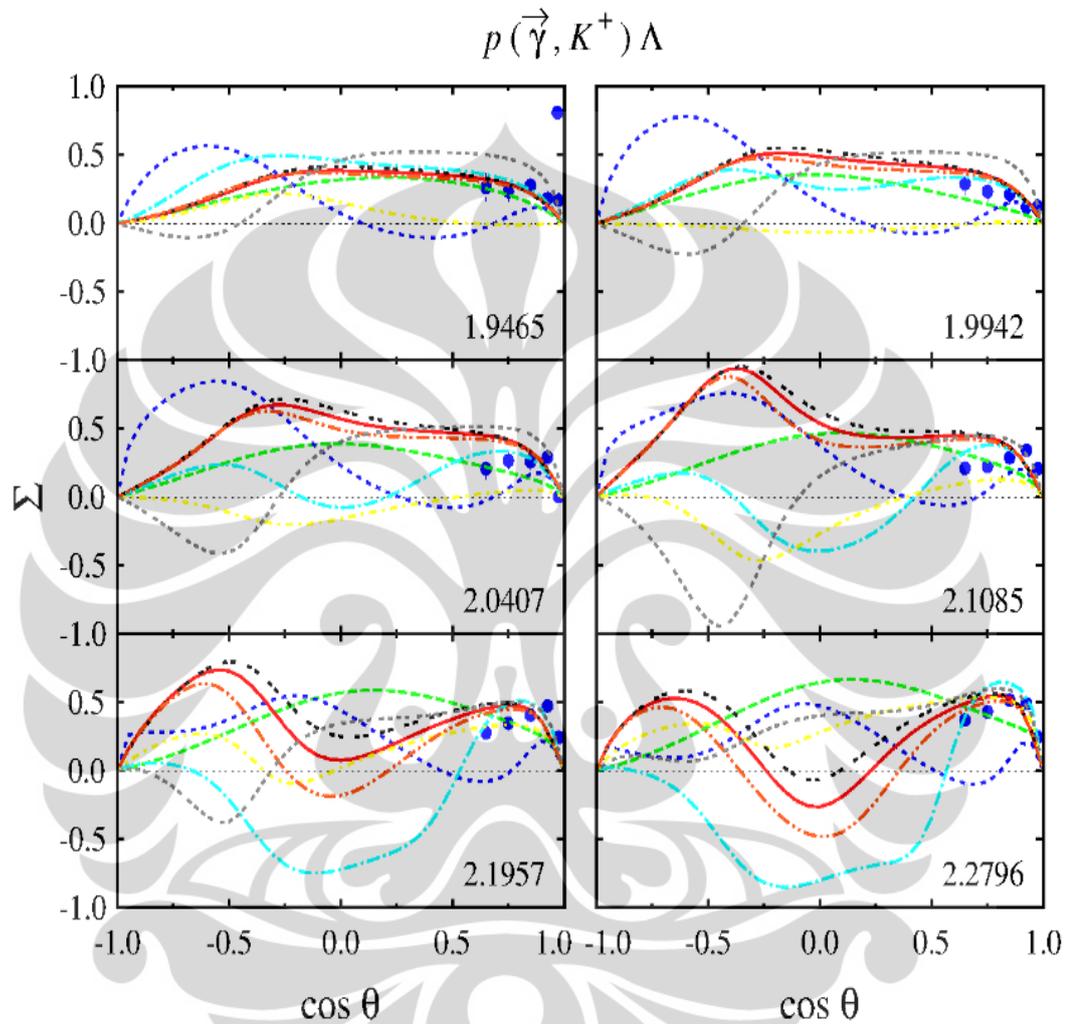
Saat energi semakin naik, grafik yang cocok dengan data eksperimen adalah grafik milik faktor bentuk general orde 4 seperti yang terlihat pada gambar 4.11. Saat energi maksimum, grafik-grafik polarisasi sudah tidak saling sejajar. Di sini (gambar 4.12) tidak ada grafik yang benar-benar sesuai dengan data eksperimen di semua sudut.

Dari grafik-grafik tersebut kebanyakan menunjukkan bahwa grafik dengan faktor bentuk hadronik lebih sesuai dengan data eksperimen dibandingkan dengan grafik tanpa faktor bentuk hadronik. Dan grafik dari faktor bentuk dipol, faktor bentuk

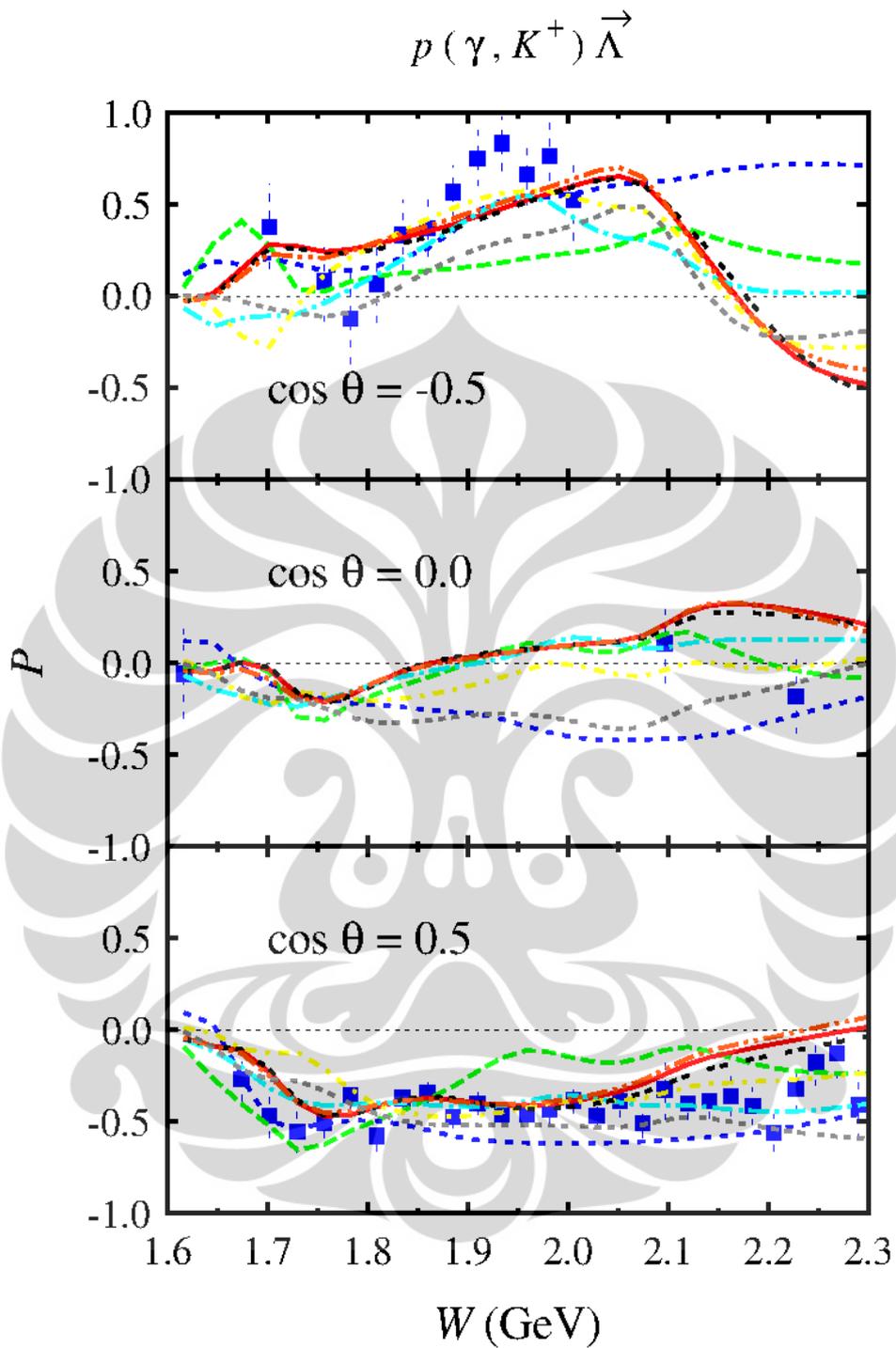


Gambar 4.6: Penampang lintang di dekat sudut depan kaon. Berbeda dengan penelitian sebelumnya seperti yang disebutkan di Bab 1.2, penampang lintang dengan faktor bentuk tidak mengalami peredaman yang ekstrim di daerah ini. Penampang lintang dengan faktor bentuk justru menunjukkan peredaman yang besar. Data point biru, merah, dan hijau berasal dari CLAS 2005. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopole garis biru, dipole garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.

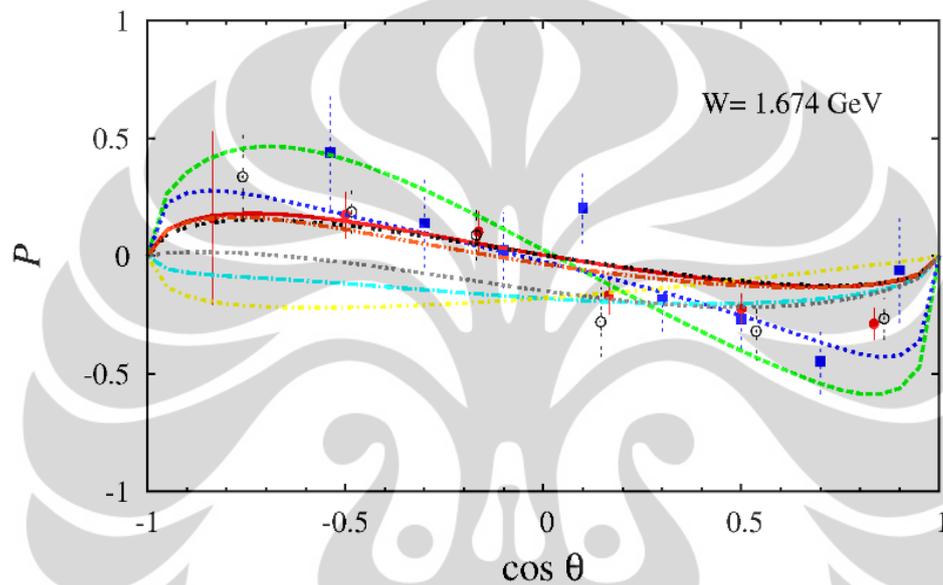
general orde 2, dan faktor bentuk general orde 3 paling banyak yang sesuai dengan data eksperimen dibandingkan dengan faktor bentuk lainnya. Sementara faktor bentuk monopole dan Gaussian seringkali tidak cocok dengan data eksperimen.



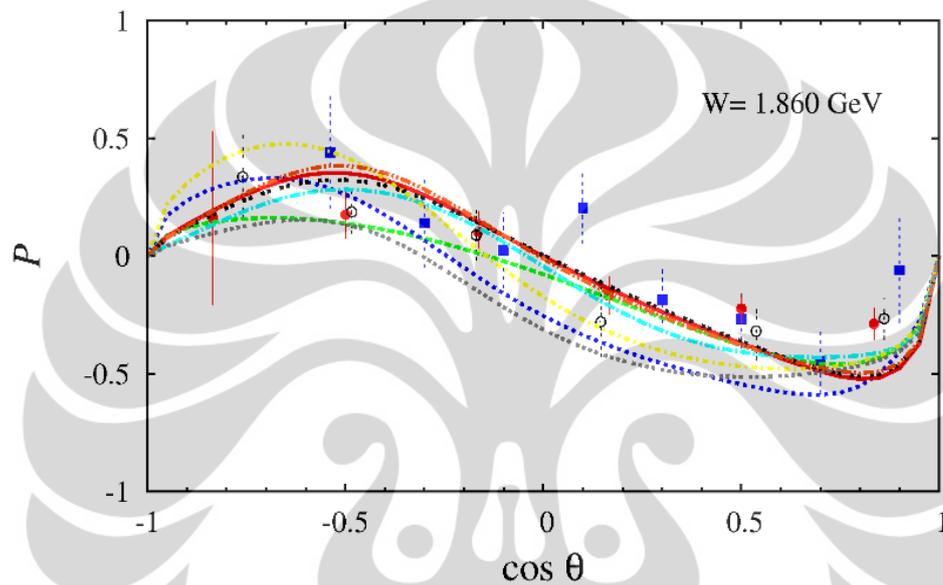
Gambar 4.7: Polarisasi foton terhadap sudut. Data point biru berasal dari Spring 8. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.



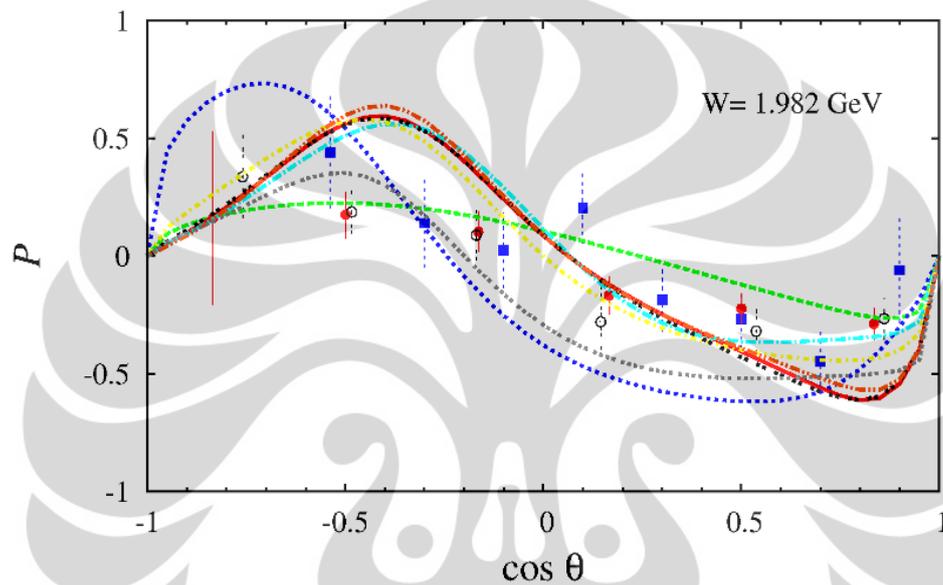
Gambar 4.8: Polarisasi Λ terhadap energi pada sudut yang berbeda-beda. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.



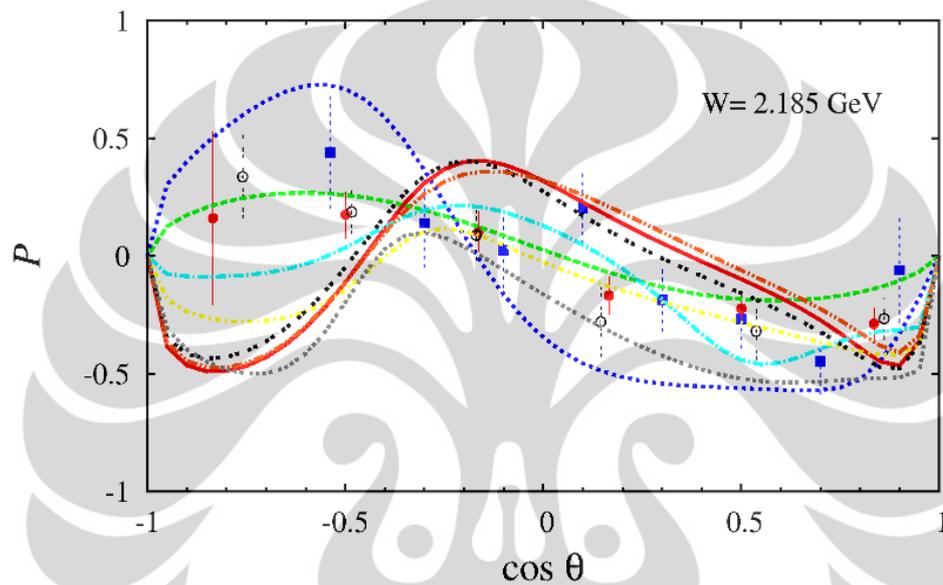
Gambar 4.9: Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 1.674 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.



Gambar 4.10: Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 1.860 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.



Gambar 4.11: Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 1.982 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.



Gambar 4.12: Polarisasi Λ terhadap sudut pada energi 2.185 GeV. Data point biru berasal dari CLAS 2006, data point merah dari Saphir 2007, dan data point hitam dari GRAAL 2007. Penampang lintang tanpa faktor bentuk ditunjukkan oleh garis hijau, monopol garis biru, dipol garis merah, Gaussian garis biru muda, bentuk general orde 1 garis kuning, bentuk general orde 2 garis hitam, bentuk general orde 3 garis oranye, dan bentuk general orde 4 garis abu-abu.

BAB 5

Kesimpulan

Dari hasil yang didapat dalam penelitian, faktor bentuk hadronik terbukti tidak meredam cross section pada sudut depan kaon. Pemasukkan faktor bentuk hadronik ke dalam perhitungan reaksi $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda$ justru memberikan hasil yang lebih sesuai dengan data eksperimen dibandingkan dengan hasil yang tanpa menggunakan faktor bentuk hadronik. Bentuk fungsi faktor bentuk hadronik yang dapat mereproduksi data eksperimen dengan baik adalah faktor bentuk dipol dan faktor bentuk general orde 2, 3, dan 4. Namun bentuk tersebut tidak dapat mereproduksi data penampang lintang di energi 1.7 GeV serta pada beberapa energi polarisasi. Kemungkinan ketiga faktor bentuk di atas dapat cocok dengan data eksperimen di semua wilayah energi. Caranya dapat dengan memperkecil lagi nilai chi kuadrat, mengingat chi kuadrat untuk ketiga faktor bentuk yang disebutkan di atas masih cukup besar yaitu sekitar 2,88. Kedepannya faktor bentuk yang paling baik digunakan dalam fotoproduksi kaon adalah faktor bentuk dipol, faktor bentuk general orde 2, faktor bentuk general orde 3, dan faktor bentuk general orde 4.

DAFTAR ACUAN

- [1] G.D. Rochester and C.C. Butler, *Nature* **160**, 855-857 (1947)
- [2] P. Bydzovsky and T. Mart, *Phys. Rev. C* **76**, 065202 (2007).
- [3] R. Bradford et al., *Phys. Rev. C* **73**, 0305202 (2006).
- [4] M. E. McCracken et al., *Phys. Rev. C* **81**, 025201 (2010).
- [5] M. Sumihama et al., *Phys. Rev. C* **73**, 035214 (2006).
- [6] A. Lleres et al., *Eur. Phys. J. A* **39**, 149 (2009).
- [7] T. Feuster and U. Mossel, *Phys. Rev. C* **58**, 457-488 (1998).
- [8] S.S. De, *Acta Physica Polonica B* **8**, 521-528 (1977).
- [9] R.A. Adelseck and B. Saghai, *Phys. Rev. C* **42**, 108-127 (1990).
- [10] . Capstick and W. Roberts, *Phys. Rev. D* **58**, 074011 (1998).
- [11] . Haberzettl et al., *Phys. Rev. C* **58**, 1 (1998).
- [12] . Haberzettl et al., *Few Body System Suppl.* **99**, 1-5 (2008).
- [13] . Kohl, *Nuclear Physics A* **805**, 361c - 368c (2008).
- [14] .V. Maxwell, *Phys. Rev. C* **85**, 034611 (2012).
- [15] F. Halzen and A.D. Martin (1984). *Quarks and Leptons*. New York : John Wiley and Sons, Inc.
- [16] A.W. Thomas and W. Weise (2000) *The Structure of Nucleon*. Berlin: Wiley-VCH.

LAMPIRAN A

Invarian Tera

A.1 Syarat Invarian Tera

Syarat invarian tera adalah

$$\partial_\mu A^\mu = 0 \quad (\text{A.1})$$

dengan

$$A^\mu = \epsilon^\mu e^{-ik \cdot x} \quad (\text{A.2})$$

sehingga

$$\begin{aligned} \partial_\mu A^\mu &= -ik_\mu \epsilon^\mu e^{-ik \cdot x} \\ 0 &= -ik_\mu A^\mu \end{aligned}$$

maka didapatkan

$$k_\mu A^\mu = 0 \quad (\text{A.3})$$

Amplitudo dapat dituliskan sebagai $\epsilon_\mu J^\mu$, maka amplitudo invarian tera jika $k_\mu J^\mu = 0$. Jika ϵ disubstitusikan dengan k dan menghasilkan amplitudo sama dengan nol, maka amplitudo memenuhi invarian tera. Matriks \mathcal{M}_j selalu memenuhi invarian tera, hal ini dapat dibuktikan

$$M_1 = -\frac{1}{2} \gamma_5 (\not{k} \not{\epsilon} - \not{\epsilon} \not{k})$$

substitusi ϵ dengan k

$$\begin{aligned} M_1 &= -\frac{1}{2} \gamma_5 (\not{k} \not{k} - \not{k} \not{k}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

terbukti bahwa M_1 memenuhi invarian tera.

A.2 Matriks Invarian Tera dan Lorentz

$$M_1 = \frac{1}{2} \gamma_5 (\not{\epsilon} \not{k} - \not{k} \not{\epsilon}) \quad (\text{A.4})$$

$$M_2 = \gamma_5 [(2q - k) \cdot \epsilon P \cdot k - (2q - k) \cdot k P \cdot \epsilon] \quad (\text{A.5})$$

$$M_3 = \gamma_5 (k \cdot q \not{\epsilon} - q \cdot \epsilon \not{k}) \quad (\text{A.6})$$

$$M_4 = i \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \gamma^\mu q^\nu \epsilon^\rho k^\sigma \quad (\text{A.7})$$

$$M_5 = \gamma_5 (q \cdot \epsilon k^2 - k \cdot q k \cdot \epsilon) \quad (\text{A.8})$$

$$M_6 = -\gamma_5 (k \cdot \epsilon \not{k} - k^2 \not{\epsilon}). \quad (\text{A.9})$$

LAMPIRAN B

Amplitudo

Matriks transisi dari partikel yang dianalisis dalam penelitian ini:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}^P &= \bar{u}_\Lambda \frac{ieg_{K\Lambda N}}{s - m_P^2} \left[\{-F_1^P + \frac{K_P F_2^P}{2m_P} (m_\Lambda - m_P)\} M_1 + \frac{2F_1^P}{t - m_K} M_2 \right. \\ &\quad \left. + \{k^2 - 2(s - m_P^2)\} \frac{F_1^P}{k^2(t - m_K^2)} M_5 + \frac{K_P}{2m_P} F_2^P (M_4 + M_3) \right] u_P \quad (\text{B.1}) \end{aligned}$$

$$\mathcal{M}^\Lambda = \bar{u}_\Lambda \frac{ieg_{K\Lambda N}}{u - m_\Lambda^2} \left[\left(\frac{m_P}{m_\Lambda} - 1 \right) \frac{K_\Lambda}{2m_\Lambda} F_2^\Lambda M_1 + \frac{K_\Lambda}{2m_\Lambda} F_2^\Lambda (M_4 - M_3) \right] u_P \quad (\text{B.2})$$

$$\mathcal{M}^{K^+} = \bar{u}_\Lambda \frac{ieg_{K\Lambda N}}{k^2(t - m_K^2)} 2F^K M_5 u_P \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}^{K^*} &= \bar{u}_\Lambda \frac{iF^{K^*K}}{M(t - m_{K^*}^2)} \left[G^V M_4 + \frac{G^T}{m_P + m_\Lambda} \{tM_1 + (m_P - m_\Lambda)(M_3 - M_6)\} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 + \frac{k^2}{t - m_K^2} \right) M_2 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{(s - m_P^2) - (u - m_\Lambda^2)}{t - m_K^2} \right\} M_5 \right] u_P \quad (\text{B.4}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}^{K1} &= \bar{u}_\Lambda \frac{F^{K1}}{t - m_{K1}^2 + im_{K1}\Gamma_{K1}} \left[\left\{ G_{K1}^V + G_{K1}^V \frac{m_\Lambda - m_P}{m_\Lambda + m_P} \right\} (M_3 - M_6) \right. \\ &\quad \left. \left\{ -\frac{G_{K1}^T}{m_P + m_\Lambda} \left(1 + \frac{k^2}{t - m_K^2} \right) \right\} M_2 \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{1}{2} \frac{G_{K1}^T}{m_P + m_\Lambda} \left(\frac{(s - m_P^2) - (u - m_\Lambda^2)}{t - m_K^2} \right) \right\} M_5 \right] u_P \quad (\text{B.5}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}^{N^*} &= \bar{u}_\Lambda \frac{ieG_{K\Lambda N} F_2^N}{s - m_N^2 + im_N \Gamma_N} \frac{1}{m_P + m_N} \\ &\quad \times \{ (m_\Lambda - m_N + i\Gamma_{N/2}) M_1 + M_4 + M_3 \} u_P \quad (\text{B.6}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}^{\Sigma^0} &= \bar{u}_\Lambda \frac{ieg_{K\Sigma N}}{u - m_{\Sigma^0}^2} \left\{ -\frac{m_{\Sigma^0} - m_P}{m_{\Sigma^0} + m_\Lambda} K_T F_2^T M_1 \right. \\ &\quad \left. + \frac{K_T}{m_{\Sigma^0} + m_\Lambda} F_2^T (M_4 - M_3) \right\} u_P \quad (\text{B.7}) \end{aligned}$$